

# 遗传-禁忌搜索优化的三维 DV-Hop 定位算法

余修武<sup>1,2,3</sup>, 黄露平<sup>1</sup>, 刘永<sup>1,2,3</sup>, 余昊<sup>1</sup>, 李佩<sup>1</sup>

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 衡阳 421001;

2. 铀矿冶放射性控制技术湖南省工程研究中心, 衡阳 421001;

3. 湖南省铀尾矿库退役治理工程技术研究中心, 衡阳 421001)

**摘要:** 为进一步提升无线传感器网络的定位精度和稳定性,提出了一种利用遗传-禁忌搜索法改进的三维 distance vector-hop (DV-Hop) 定位优化算法 (TDGT)。首先利用最优跳数、跳数调整因子以及锚节点距离误差加权值对 DV-Hop 中的节点间跳数和平均跳数进行改进和修正,降低了算法的定位误差;其次将具有快速搜索能力的禁忌搜索引入遗传算法中进行寻优,提升了算法的搜索效率和定位准确性。仿真结果表明,TDGT 与现有的无线传感器网络定位算法相比,具有更佳的寻优搜索能力、定位精度和稳定性。

**关键词:** 无线传感器网络; 节点定位; 遗传算法; 禁忌搜索; DV-Hop

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

## Three-Dimensional DV-Hop Location Algorithm Based on Genetic-Tabu Search Optimization in WSN

YU Xiu-wu<sup>1,2,3</sup>, HUANG Lu-ping<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1,2,3</sup>, YU Hao<sup>1</sup>, LI Pei<sup>1</sup>

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Hunan Province Engineering Technology Research Center of Uranium Tailings Treatment, Hengyang 421001, China;

3. Hunan Province Engineering Research Center of Radioactive Control Technology in Uranium Mining and Metallurgy, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** To enhance the positioning accuracy and stability of wireless sensor network (WSN), a three-dimensional dv-hop positioning optimization algorithm is proposed based on an improved genetic-tabu search method (TDGT). First, the optimal hop number, hop adjustment factor, and anchor node distance error weighted value are used to improve and modify the hop number and average hop number in dv-hop to reduce the positioning error. Then, a fast tabu search is introduced into genetic algorithm to further improve the search efficiency and positioning accuracy. The simulation results show that the TDGT algorithm has better search ability, location accuracy and stability than the existing wireless sensor network localization algorithm.

**Key words:** wireless sensor network; nodes positioning; genetic algorithm; tabu search; DV-Hop

随着智能化技术的快速发展,具有自组织性的无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 在军工安全、预警监测和智能家居等诸多领域均得到

了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。利用 WSN 进行数据采集和监测时需结合其位置信息以确保信息的有效性,因此,定位技术是 WSN 中必不可少的核心技术。在对未知节

收稿日期: 2020-10-20

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2018SK2055); 国家自然科学基金项目 (11875164)

作者简介: 余修武 (1976—), 男, 教授, 硕士生导师。

通信作者: 黄露平 (1997—), 女, 硕士生, E-mail: 853561165@qq.com.

点进行定位时,根据是否需要通过物理测量来获得节点之间的距离或角度信息,可将定位算法分为基于测距的定位算法和无需测距的定位算法<sup>[4-6]</sup>. DV-Hop(distance vector-hop)算法作为典型的无需测距的定位算法<sup>[7]</sup>,因其定位成本低且易于实现得到了众多学者青睐.

石琴琴等<sup>[8]</sup>针对 DV-Hop 算法存在测距误差敏感的问题,利用路径相似度参数对比来选择最佳的锚节点间路径,以此得到更优的未知节点与锚节点间路径. 并通过改进粒子群算法(PSO, particle swarm optimization)对它进行优化,使算法的定位精度得到提升. 但提出的 PSO-DV 算法在搜索节点连接路径最优逼近策略的指标单一. 徐慧娟<sup>[9]</sup>提出了 IDV-Hop-GSAL 算法,通过引入节点相似度对 DV-Hop 测距值进行修正,再利用最小二乘法得到未知节点的初始解,最后采用遗传模拟退火算法对它进行优化,得到未知节点的最优位置. 该种算法虽然提升了定位精度,但是它的收敛速度较慢,容易陷入局部最优值.

随着传感器网络空间定位需求的不断提高,三维空间的定位开拓了一个新的研究方向. 刘直良等<sup>[10]</sup>利用锚节点与未知节点路径的椭圆特性并结合椭圆离心率来测量锚节点与未知节点间的距离,从而提升三维水下传感网的定位精度. 侯志伟等<sup>[11]</sup>为提升三维空间下 DV-Hop 算法的定位精度,利用最小二乘法对最小跳数进行平均加权,并通过二次规划求解坐标. Amanpreet Kaur 等<sup>[12]</sup>针对二维和三维条件下 DV-Hop 算法定位误差大的问题,提出了利用灰狼及加权灰狼法改进平均跳距从而降低定位误差. 这些算法虽然在一定程度上减小了定位误差,但在三维空间中的计算过程繁琐且搜索效率较低. 因此,笔者在结合三维空间和提升 DV-Hop 定位精度的基础上,提出基于遗传-禁忌搜索优化的三维 DV-Hop 定位算法(TDGT, three-dimensional DV-Hop location algorithm based on genetic-tabu). 先利用最优跳数、跳

数调整因子以及锚节点距离误差加权值对跳数进行修正,再将遗传与禁忌算法相结合优化改进后的 DV-Hop 算法,减小定位误差,提升寻优能力和定位稳定性.

## 1 三维 DV-Hop 定位算法

### 1.1 算法模型

DV-Hop 定位算法是 Range-free 算法的代表之一,三维 DV-Hop 定位算法是基于原二维算法的理论基础上实现的,其定位过程主要分为以下 3 个步骤.

1) 计算最小跳数. 所有锚节点通过距离矢量交换协议将含有自身 ID 的坐标信息广播给通信范围内的邻居节点. 接收到信息的节点保留来自每个锚节点的最小跳数,并将跳数加 1 继续转发给下一邻居节点,直到网络中每个节点都有到相对距离最近锚节点的位置信息和最小跳数.

2) 计算跳距值. 网络中的每个锚节点得到了与其他锚节点间的最小跳数和位置信息,设锚节点  $i$  和  $j$  的坐标分别为  $(x_i, y_i, z_i)$  和  $(x_j, y_j, z_j)$ ,两节点间的最小跳数为  $h_{i,j}$ ,可求得节点的平均跳距为

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}{\sum_{i \neq j} h_{i,j}} \quad (1)$$

3) 计算节点坐标. 三维 DV-Hop 定位模型如图 1 所示.

设待定位节点的坐标为  $(x, y, z)$ ,锚节点的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),可得未知节点与各锚节点间的距离关系为

$$\left. \begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 &= d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 &= d_2^2 \\ &\vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2 &= d_n^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由极大似然估计法可得

$$\left. \begin{aligned} x_1^2 - x_m^2 - 2x(x_1 - x_m) + y_1^2 - y_m^2 - 2y(y_1 - y_m) + z_1^2 - z_m^2 - 2z(z_1 - z_m) &= d_1^2 - d_m^2 \\ x_2^2 - x_m^2 - 2x(x_2 - x_m) + y_2^2 - y_m^2 - 2y(y_2 - y_m) + z_2^2 - z_m^2 - 2z(z_2 - z_m) &= d_2^2 - d_m^2 \\ &\vdots \\ x_n^2 - x_m^2 - 2x(x_n - x_m) + y_n^2 - y_m^2 - 2y(y_n - y_m) + z_n^2 - z_m^2 - 2z(z_n - z_m) &= d_n^2 - d_m^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将式(3)中的方程组化为矩阵形式  $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$ ,即

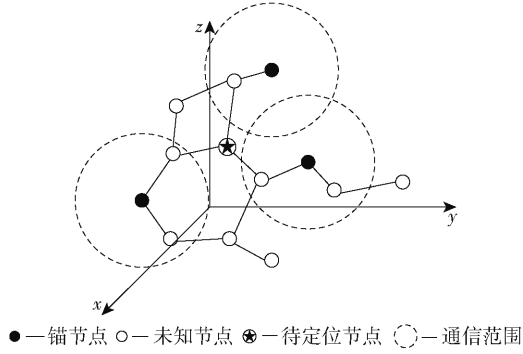


图1 三维 DV-Hop 定位模型

$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_m) & 2(y_1 - y_m) & 2(z_1 - z_m) \\ 2(x_2 - x_m) & 2(y_2 - y_m) & 2(z_2 - z_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_n - x_m) & 2(y_n - y_m) & 2(z_n - z_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_m^2 + x_1^2 - x_m^2 + y_1^2 - y_m^2 + z_1^2 - z_m^2 \\ d_2^2 - d_m^2 + x_2^2 - x_m^2 + y_2^2 - y_m^2 + z_2^2 - z_m^2 \\ \vdots \\ d_n^2 - d_m^2 + x_n^2 - x_m^2 + y_n^2 - y_m^2 + z_n^2 - z_m^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据最小二乘法,可得待定位节点的坐标式:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (5)$$

## 1.2 误差分析

1) 跳数误差. 在计算跳数时, DV-Hop 定位算法把锚节点通信范围内的所有邻居节点都计为 1 跳. 如图 2 所示, 设节点  $B, C$  和  $D$  是节点  $A$  通信范围内的单跳节点, 节点  $E$  在锚节点  $A$  通信范围外, 且能接收到节点  $B$  转发来的锚节点的位置信息, 故节点  $E$  的跳数为 2.

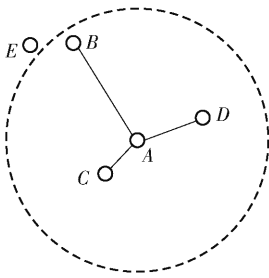


图2 跳数误差示意图

由图 2 可以看出, 跳数为 1 的节点  $B, C, D$  到锚节点  $A$  的距离差距较大, 而节点  $E, B$  与锚节点  $A$  的距离相近, 但是跳数却不相同. 在这种情况下采用传统的 DV-Hop 定位算法会产生较大的误差.

2) 平均跳距误差. DV-Hop 算法的定位精度主要取决于对平均跳距的取值是否合理, 在多跳的情

况下, 设节点  $A$  和  $B$  之间的跳数为 4 跳,  $A$  与  $B$  之间的折线距离即为 DV-Hop 算法的估计距离, 可以直观地看出与虚线所示的实际距离存在较大偏差, 如图 3 所示. 由此可知, 随着跳数的增加, 在节点密度较低的区域存在较大的定位误差.



图3 平均跳距误差示意图

## 2 遗传-禁忌搜索优化的三维 DV-Hop 算法

### 2.1 DV-Hop 算法优化

由于 DV-Hop 存在一定的定位误差, 陈万志等<sup>[13]</sup>通过设置跳数阈值以及修正锚节点平均跳距以提升定位精度; 温江涛等<sup>[14]</sup>利用接收信号强度修正跳数值从而降低定位误差. 这些方法虽有效提高定位精度但考虑 DV-Hop 算法产生定位误差的原因不够全面, 因此从跳数和节点平均跳距两方面对 DV-Hop 算法进行改进, 可提升定位精度.

#### 1) 跳数的改进

针对跳数引起的定位误差, 通过引用相对最优跳数对通信范围内的单跳邻居节点加以限制, 有

$$H_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{R} \quad (6)$$

其中:  $H_{i,j}$  为相对最优跳数,  $d_{i,j}$  为锚节点  $i, j$  间的实际距离,  $R$  为通信半径.

比较锚节点  $i, j$  之间最小跳数  $h_{i,j}$  与相对最优跳数  $H_{i,j}$  的差值, 即可得到偏差系数为

$$\mu_{i,j} = \frac{|h_{i,j} - H_{i,j}|}{h_{i,j}} \quad (7)$$

偏差系数  $\mu_{i,j}$  反映了锚节点间最小跳数与相对最优跳数之间的差异大小,  $\mu_{i,j}$  越大, 说明两者之间较大的差异. 当通信半径不变时, 最小跳数一般不小于相对最优跳数, 因此, 可以利用跳数调整因子  $\varepsilon_{i,j}$  来优化跳数信息, 以减少累积误差, 有

$$\varepsilon_{i,j} = 1 - \mu_{i,j}^2 \quad (8)$$

由此, 可以得到锚节点间的修正跳数为

$$\bar{h}_{i,j} = \varepsilon_{i,j} h_{i,j} \quad (9)$$

#### 2) 平均跳距的改进

设某 2 个锚节点坐标分别为  $(x_i, y_i, z_i)$  和  $(x_j, y_j, z_j)$ ,  $h_{i,j}$  为 2 个锚节点间的最小跳数, 可以求得 2 个锚节点间的实际距离为

$$L_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (10)$$

在已知锚节点坐标的基础上,可以求出2个锚节点间的距离误差为

$$\delta_{i,j} = |\bar{D}h_{i,j} - L_{i,j}| \quad (11)$$

由锚节点的距离误差可知,其值越大表示锚节点间的实际传播距离与理想路径偏差越大.为降低该误差值,对锚节点间的距离误差进行加权求和,权重系数为

$$\omega_{i,j} = \frac{\frac{1}{\delta_{i,j}}}{\sum_{i \neq j} \frac{1}{\delta_{i,j}}} \quad (12)$$

再利用与未知节点  $s$  距离最近的锚节点  $i$  的平均跳距  $\bar{D}_i$ ,即可求得未知节点  $s$  的平均跳距为

$$\bar{h}_s = \sum_{s=1}^n (\omega_{i,j} \bar{D}_i) \quad (13)$$

## 2.2 基于遗传-禁忌搜索的定位优化

遗传算法(GA, genetic algorithm)通过模拟自然进化过程从而搜索最优解,禁忌算法(TS, tabu search)则是一种用于跳脱局部最优的搜寻方法. GA算法具有良好的全局搜索能力,但是该算法的局部搜索能力较差,容易产生早熟收敛的问题.因此,将具有快速搜索能力的TS算法与之结合,能达到更优的定位效果.

根据未知节点  $s$  的平均跳距  $\bar{h}_s$  和该节点与锚节点  $j$  之间的最小跳数  $h_{s,j}$ ,即可求得未知节点  $s$  与锚节点  $j$  之间的距离:

$$d_{s,j} = \bar{h}_s h_{s,j} \quad (14)$$

由此可得坐标为  $(x_s, y_s, z_s)$  的未知节点  $s$  和坐标为  $(x_j, y_j, z_j)$  的锚节点  $j(j=1, 2, \dots, n)$  之间的距离关系方程组:

$$\left. \begin{aligned} (x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2 &= d_{s,1}^2 \\ (x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2 &= d_{s,2}^2 \\ &\vdots \\ (x_s - x_n)^2 + (y_s - y_n)^2 + (z_s - z_n)^2 &= d_{s,n}^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

利用极大似然估计法可得未知节点的估计位置,同时可得适应度函数为

$$f(x_s, y_s, z_s) =$$

$$\min \left[ \sum_{j=1}^n |\sqrt{(x_s - x_j)^2 + (y_s - y_j)^2 + (z_s - z_j)^2} - d_{s,j}| \right] \quad (16)$$

### 1) 选择

根据群体中的个体适应度,采用轮盘赌法选择

群体中的优胜个体,个体  $a$  被选中的概率为

$$P_{i,a} = \frac{f(a)}{\sum f(a)} \quad (17)$$

其中: $f(a)$ 为个体  $a$  的适应度,  $\sum f(a)$ 为种群中个体适应度之和.

在每一轮的选择中都会产生1个 $[0,1]$ 的均匀随机数,将这个数作为选择指针从而确定被选择个体,适应度越高的个体被选中的概率越大.

### 2) 交叉禁忌

将2个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的过程叫做交叉,通过交叉可以使GA算法的搜索能力得以提升.因此,在GA算法中交叉率( $P_c$ )的大小至关重要,由式(18)可得自适应交叉率为

$$P_c = \begin{cases} k_1 \frac{(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f_{\text{avg}} \leq f \\ k_2, & f_{\text{avg}} > f \end{cases} \quad (18)$$

其中: $k_1$ 和 $k_2$ 为 $[0,1]$ 之间的常数, $f_{\max}$ 表示群体中最大的个体适应度, $f$ 表示交叉2个个体中较大的适应度, $f_{\text{avg}}$ 表示群体的平均适应度.

当 $P_c$ 较小时,算法收敛较慢;而当 $P_c$ 偏大时,新个体产生速度加快,但是算法稳定性变弱.因此,在交叉后产生的新子代中引入禁忌算法.将个体适应度值录入禁忌表中,设定禁忌长度并对个体适应度以及种群适应度值进行比较.若个体适应度值高于群体的平均适应度值,该个体将遗传到下一代并更新禁忌表.若个体适应度值低于群体平均适应度值,则利用禁忌表对该个体进行判别,若不属于禁忌将其遗传到下一代;若属于禁忌,选取目前群体中的最优个体遗传到下一代.

### 3) 变异禁忌

为避免在算法迭代后期陷入局部收敛,根据变异概率( $P_m$ )对个体进行变异,如

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3 (f_{\max} - f_{(u)})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f_{\text{avg}} \leq f_{(u)} \\ k_4, & f_{\text{avg}} > f_{(u)} \end{cases} \quad (19)$$

其中: $k_3$ 和 $k_4$ 为常数,取值范围 $[0,1]$ ;  $f_{(u)}$ 为变异个体  $u$  的适应度.

### 4) 三维定位优化

将当前变异个体作为禁忌搜索的初始解并产生对应候选解集,根据禁忌表及解的三维适应度值确定最优解,同时更新禁忌表.将遗传-禁忌优化后得



到的全局最优解代入式(15)可得待定位节点在三维空间条件下的坐标位置. 算法流程如图4所示.

### 3 仿真分析

为验证 TDGT 算法的有效性,利用 Matlab2016b 对算法进行模拟仿真. 设定仿真区域为  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ , 选用平均定位误差  $\varphi$  对算法性能进行评价,如

$$\varphi = \frac{\sum_{k=1}^N \sqrt{(x_k - \hat{x}_k)^2 + (y_k - \hat{y}_k)^2 + (z_k - \hat{z}_k)^2}}{NR} \quad (20)$$

其中:  $(x_k, y_k, z_k)$  为未知节点  $k$  的实际位置,  $(\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k)$  为未知节点  $k$  的估计位置,  $N$  为未知节点个数,  $R$  为通信半径(单位: m).

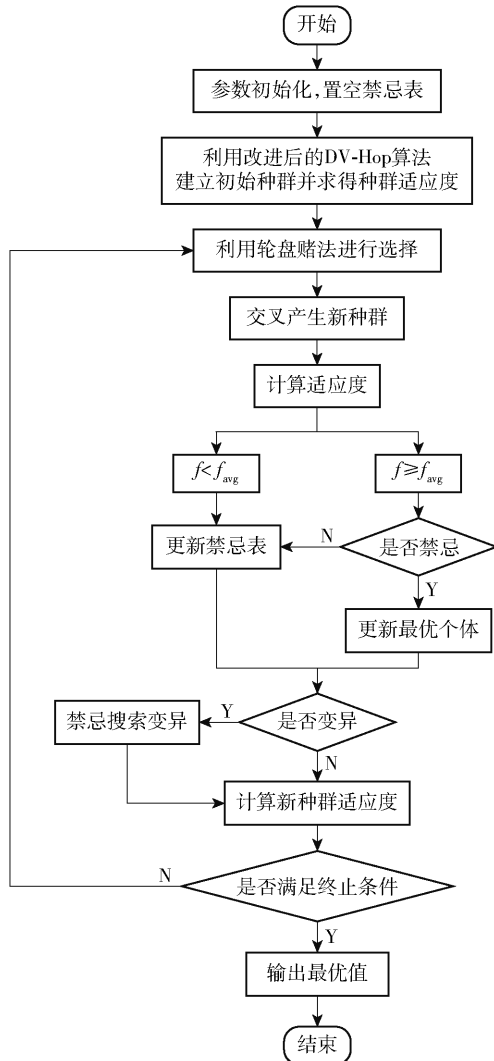


图4 TDGT 算法流程

#### 3.1 未知节点定位误差

在仿真区域中随机生成 100 个节点,其中有 20

个锚节点. 将 TDGT 算法与 IDV-Hop-GSAL 算法、PSO-DV 算法的未知节点平均定位误差率进行比较,可以得到平均定位误差率,如图5所示.

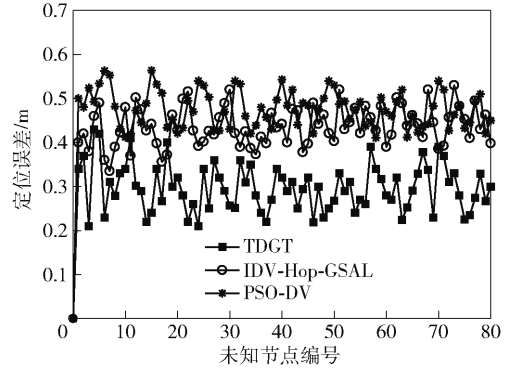


图5 不同算法未知节点的定位误差对比

由图5可见,TDGT 算法未知节点的定位误差在  $0.21 \sim 0.43\text{ m}$  间波动, IDV-Hop-GSAL 算法和 PSO-DV 算法的未知节点定位误差波动范围分别为  $0.34 \sim 0.53\text{ m}$  和  $0.41 \sim 0.57\text{ m}$ . TDGT 算法、IDV-Hop-GSAL 算法和 PSO-DV 算法未知节点的平均定位误差值分别为  $0.297, 0.438, 0.476\text{ m}$ , TDGT 算法与另外 2 种算法相比,其未知节点的定位精度分别提高了 32% 和 38%,具有更高的定位精度和更好的稳定性.

#### 3.2 算法运行时间对比

通过对比不同节点总数条件下各算法求得未知节点坐标的运行时间,可得节点总数与算法运行时间的关系,如图6所示.

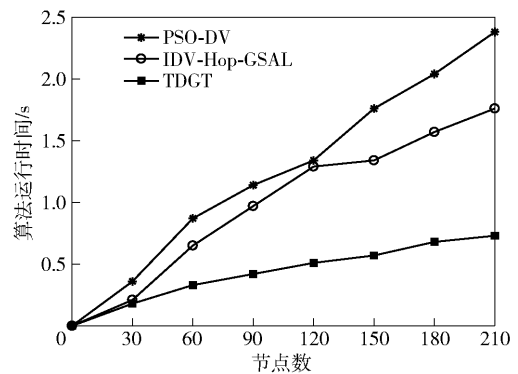


图6 节点总数与算法运行时间

由图6可见,TDGT 算法的运行时间明显低于 PSO-DV 算法和 IDV-Hop-GSAL 算法的运行时间. TDGT 算法的平均运行时间为  $0.49\text{ s}$ , 相较 PSO-DV 算法的运行时间  $1.39\text{ s}$ , 缩短了  $0.9\text{ s}$ , 与 IDV-Hop-GSAL 算法的运行时间  $1.11\text{ s}$  相比算法的运行时间

缩短了 0.62 s.

### 3.3 锚节点比例对定位精度的影响

在网络区域内随机布设 100 个节点,锚节点的比例从 5% 变化至 30%,设  $R = 20$  m,可得未知节点的平均定位误差,如图 7 所示.可以看出,这 3 种算法的平均定位误差总体上均随着锚节点比例的增加而逐渐减小,其中 TDGT 算法的平均定位误差明显低于另外 2 种算法.在不同锚节点比例条件下,TDGT 算法的平均定位误差相比 PSO-DV 和 IDV-Hop-GSAL 算法分别降低了 51.2% 和 8.8%.

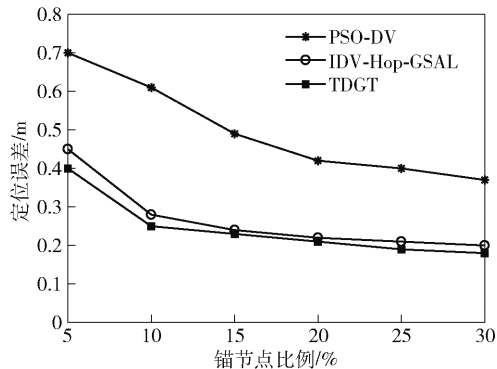


图7 锚节点比例与定位误差

### 3.4 通信半径对定位精度的影响

在网络区域中随机布设 100 个传感器节点,设定锚节点个数为 20, $R$  从 10 m 增加至 40 m,得到节点平均定位误差,如图 8 所示.

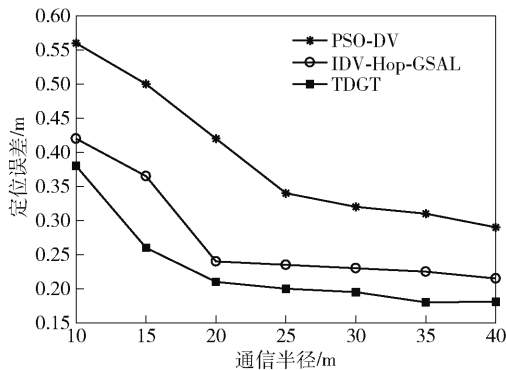


图8 通信半径与定位误差

从图 8 可以看出,随着  $R$  的增加 3 种算法的平均定位误差均呈下降趋势.在不同通信半径条件下,TDGT 算法与 PSO-DV 和 IDV-Hop-GSAL 算法相比定位精度分别提高了 16.2%、4.6%.

### 3.5 节点总数对定位精度的影响

在网络区域中随机布设 10 个锚节点,节点通信半径设为 20 m,将节点总数分别设置为 100,120,

140,160,180,200,得到 3 种算法的平均定位误差,如图 9 所示.

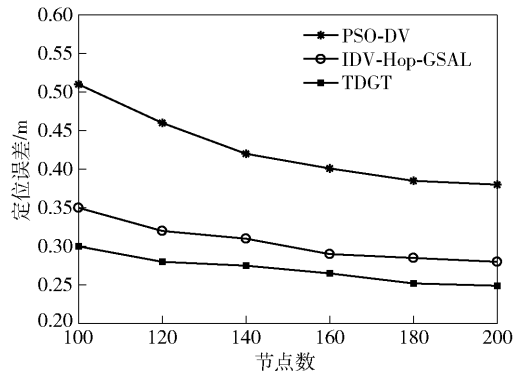


图9 节点总数与定位误差

由图可见,随着节点总数的增加,3 种算法的平均定位误差逐渐减小并趋于稳定.同时,TDGT 算法在节点总数不同条件下明显优于另外 2 种算法. TDGT 算法的定位误差相较 PSO-DV 算法和 IDV-Hop-GSAL 算法分别减小了 36.6%、11.7%.

## 4 结束语

针对现有 DV-Hop 算法定位精度和稳定性低的问题,提出了基于遗传-禁忌搜索优化的三维 DV-Hop 定位算法.通过引入最优跳数和跳数调整因子,对节点间跳数进行修正,再对锚节点间的距离误差加权,从而改进平均跳数,最后将遗传算法与禁忌搜索相结合,对输出结果进行优化,提升搜索效率的同时减小了定位误差.通过仿真模拟 TDGT 算法、PSO-DV 算法以及 IDV-Hop-GSAL 算法,结果表明 TDGT 的稳定性和定位精度更优;在不同锚节点比例、通信半径和节点总数条件下,TDGT 有更佳的性能.

### 参考文献:

- [1] Mirza G F, Ahmed A, Bohra N, et al. Performance analysis of location based smart catastrophe monitoring system using WSN [J]. Wireless Personal Communications, 2018, 101(1): 405-424.
  - [2] 余修武, 周利兴, 余齐豪, 等. 基于刚分簇与鸡群优化的深井无线传感网络定位算法[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 870-878.
- Yu Xiuyu, Zhou Lixing, Yu Qihao, et al. Localization algorithm for mine wireless sensor network based on rigid cluster and chicken swarm optimization [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4): 870-878.

- [3] 胡中栋, 王俊岭, 王振东, 等. 山区复杂地形的无线传感器网络节点定位算法[J]. 北京邮电大学学报, 2019, 42(5): 113-118.  
Hu Zhongdong, Wang Junling, Wang Zhendong, et al. Node localization algorithm of wireless sensor networks for complex terrain in mountain areas[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019, 42(5): 113-118.
- [4] Kiruthiga G, Mohanapriya M. An adaptive signal strength based localization approach for wireless sensor networks[J]. Cluster Computing, 2019, 22(5): 10439-10448.
- [5] Prashar D, Jyoti K. Distance error correction based hop localization algorithm for wireless sensor network[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 106(3): 1465-1488.
- [6] SrideviPonmalar P, Kumar V J S, Harikrishnan R. Hybrid firefly variants algorithm for localization optimization in WSN[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2017, 10(1): 1263.
- [7] Singh S P, Sharma S C. Implementation of a PSO based improved localization algorithm for wireless sensor networks[J]. IETE Journal of Research, 2019, 65(4): 502-514.
- [8] 石琴琴, 徐强, 张建平. 基于最佳路径匹配的 DV-Hop 改进方法[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(2): 316-323, 331.  
Shi Qinqin, Xu Qiang, Zhang Jianping. Improved DV-hop localization scheme based on the best path matching strategy[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 316-323, 331.
- [9] 徐慧娟. 基于 DV-Hop 测距修正的遗传模拟退火定位算法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 147-151.  
Xu Huijuan. Improved DV-hop ranging-based genetic-simulated annealing localization algorithm in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 147-151.
- [10] 刘直良, 刘栓. 基于椭圆 DV-Hop 测距的三维 USN 定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(12): 3218-3223.  
Liu Zhiliang, Liu Shuan. Elliptical ranging-based DV-hop localization algorithm for 3D underwater wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(12): 3218-3223.
- [11] 侯志伟, 包理群, 安丽霞. 基于残差加权的三维 DV-Hop 改进 WSN 定位算法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(1): 112-115.  
Hou Zhiwei, Bao Liqun, An Lixia. Improved three-dimensional DV-hop localisation algorithm for wsn based on weighted residual error[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(1): 112-115.
- [12] Kaur A, Kumar P, Gupta G P. Nature inspired algorithm-based improved variants of DV-hop algorithm for randomly deployed 2D and 3D wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 101(1): 567-582.
- [13] 陈万志, 张洋. 改进的无线传感器网络 DV-Hop 定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(10): 108-111, 156.  
Chen Wanzhi, Zhang Yang. Improved DV-hop localization algorithm for wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(10): 108-111, 156.
- [14] 温江涛, 范学敏, 吴希军. 基于 RSSI 跳数修正的 DV-Hop 改进算法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(1): 113-117.  
Wen Jiangtao, Fan Xuemin, Wu Xijun. Improved DV-hop location algorithm based on hop correction[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(1): 113-117.