

基于 DV-Hop 算法的无线传感器网络定位精度优化

刘川洲¹, 张玲华^{2*}

¹南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

²南京邮电大学江苏省通信与网络技术工程研究中心, 江苏 南京 210023

摘要 在无线传感器网络定位领域, DV-Hop 算法因其实现简单得以广泛使用。针对 DV-Hop 算法定位误差较大的问题, 提出一种基于 DV-Hop 多通信半径的加权定位算法。该算法利用多通信半径并通过引入修正因子细化和优化跳数, 利用最小均方误差准则和加权方式修正平均跳距, 并利用加权最小二乘法估算未知节点坐标。通过仿真得出所提算法在相同实验条件下的定位精度较 DV-Hop 算法提升约 60.5%, 相较于双通信半径优化算法和 3-DV-Hop 算法分别提升约 36.4% 和 13.8%。

关键词 传感器; 无线传感器网络; DV-Hop; 节点定位; 最小均方误差; 加权最小二乘法

中图分类号 TN929.5; TP212.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2228007

Optimization of Localization Accuracy of Wireless Sensor Network Based on DV-Hop Algorithm

Liu Chuazhou¹, Zhang Linghua^{2*}

¹College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

²Jiangsu Engineering Research Center of Communication and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract In the field of wireless sensor network positioning, the DV-Hop algorithm is widely used for its simple implementation. Aiming at the problem of large positioning error, a weighted positioning algorithm based on DV-Hop multiple communication radii is proposed. The algorithm refines and optimizes the number of hops through multiple communication radii and the introduction of correction factors, then corrects the average hop distance through the minimum mean square error criterion and weighted method, and finally estimates the coordinates of unknown nodes with the weighted least squares method. Through simulations, it is concluded that the positioning accuracy of the proposed algorithm is improved by about 60.5% compared with the DV-Hop algorithm and by about 36.4% and 13.8% compared with the dual communication radius optimization algorithm and the 3-DV-Hop algorithm respectively under the same experimental conditions.

Key words sensors; wireless sensor network; DV-Hop; node localization; minimum mean square error; weighted least squares method

OCIS codes 280.4788; 150.1135; 060.4250

收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-01-11; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61771258)

通信作者: *zhanglh@njupt.edu.cn

1 引 言

无线传感器网络 (WSN)^[1] 作为一种通过无线通信方式形成的多跳自组织网络系统, 主要包括传感器、感知对象和观察者三个要素, 综合各种技术来实现对网络覆盖区域内感知目标对象信息的监测、感知、采集以及传播处理, 通过节点之间相互协调与通信实现目标任务, 在入侵检测和跟踪、环境监测^[2]、室内监控、流量分析等方面有广泛的应用场景。为了支撑这些应用, 需要对传感器节点的位置进行精确定位。目前已有的无线传感器网络定位算法大致可分为两类: 基于测距的定位算法以及非测距定位算法。其中基于测距的定位算法在获取节点信息后通过恰当的方法计算未知节点坐标并实现对未知节点坐标的优化, 这种方法实现简单、定位精度高、定位覆盖率高, 而且操作简便^[3]。常见的基于测距的定位算法有基于到达时间测距 (TOA) 的定位算法^[4]、基于到达时间差测距 (TDOA) 的定位算法^[5] 以及基于接收信号强度 (RSSI) 的定位算法^[6]。相对于测距的定位算法而言, 非测距定位算法对硬件的依赖度更低, 但是其定位误差较大, 常见的非测距定位算法包括质心算法^[7-8]、基于距离向量 (DV-Hop) 的定位算法^[9] 以及近似三角形内点测试 (APIT) 的定位算法^[10] 等。实际应用中需要综合考虑包括成本、环境、计算复杂度等多种因素, 所以有很多情况需要用到非测距算法。其中非测距方案的经典代表之一就是 DV-Hop 算法。

DV-Hop 算法以其成本低、开销小、实现简单且对网络节点无其他要求等优点, 被广泛使用, 当然其缺点也很明显, 那就是 DV-Hop 算法定位精度较低, 受网络拓扑的影响很大。基于此, 许多研究者进行了很多的改进以使其定位更加精准。例如, 在对未知节点定位时, 通过使用双通信半径广播自身位置的信息获得更加精确的跳数, 从而获取更加精确的未知节点坐标^[11]; 在对平均跳距进行估计时, 通过使用整个无线传感器网络中的每跳平均跳距, 实现对信标节点间平均跳距的优化, 进而使用牛顿迭代法实现对未知节点的定位^[12]; 通过动态调节差分进化算法参数提高搜索精度、减小定位精度误差^[13]; 通过引入如人工蜂群^[14]、遗传算法等智能优化算法, 实现对 DV-Hop 算法的改进^[15] 等。然而, 这些算法虽然针对经典的 DV-Hop 算法进行改进, 但是改进后的定位精度仍然不是很高, 而且在引入智能优化算法之后, 整个算法的计算复杂度提高。

本文提出一种基于 DV-Hop 的加权优化 (WOA-DV-Hop) 算法, 使用多通信半径方式以及通过引入修正因子对信标节点之间的跳数进行优化, 利用最小均方误差准则实现对信标节点间平均跳距的优化, 再利用加权方式修正信标节点与未知节点之间的平均跳距, 最后通过加权最小二乘法对未知节点进行定位。仿真结果显示, 在计算复杂度基本不变的情况下, 所提算法的定位精度相对于基于双通信半径的 DV-Hop 算法以及经典 DV-Hop 算法有了很大提升。

2 经典 DV-Hop 算法

2.1 DV-Hop 算法原理简述

Niculescu 等^[16] 根据距离矢量路由协议在 2003 年提出了 APS (Ad hoc Positioning System) 算法, 其中 DV-Hop 定位算法因其无需增加额外设备、成本低、易于实现的优点被广泛使用。该定位算法分为三个阶段。

第一阶段为获取信标节点与未知节点间的最小跳数。信标节点广播信息数据包, 包括信标节点位置、跳数信息以及跳数初始值等信息; 未知节点接收到信标节点发出的包后, 更新自身跳数信息, 跳数值加 1 后转发给相邻节点, 如此重复将得到的跳数值进行筛选对比, 从而得到各未知节点到各信标节点的最小跳数。

第二阶段利用信标节点坐标和节点间最小跳数计算各信标节点自身每跳的平均跳距:

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

式中: (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别是信标节点 i 和信标节点 j 的坐标; h_{ij} 表示信标节点 i 到 j 的最小跳数; H_i 表示信标节点 i 的平均跳距。信标节点将得到的平均跳距信息广播出去, 未知节点根据离自己最近的信标节点的平均跳距作为自身跳距, 再乘以两者之间的跳数就可以得出其与信标节点之间的距离。

最后利用最小二乘法对未知节点进行定位。假设某未知节点的坐标为 (x, y) , 信标节点的坐标为 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, 其中 n 为信标节点个数, d_i 表示信标节点 i 与未知节点之间的估算距离, 则有

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (2)$$

将(2)式中前 $n-1$ 行全部减去最后一行,可得

$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_{n-1}^2 - d_1^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_{n-1}^2 - d_1^2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

则(3)式可以表示为

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}. \quad (7)$$

令误差 $\mathbf{e} = \mathbf{B} - \hat{\mathbf{B}} = \mathbf{B} - \mathbf{AX}$, 根据最小二乘估计,其优化规则为

$$\min(\mathbf{B} - \mathbf{AX})^T (\mathbf{B} - \mathbf{AX}). \quad (8)$$

令(8)式对 \mathbf{X} 求偏导,并令其值为零,可以得到 \mathbf{X} 的估计值为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}. \quad (9)$$

2.2 DV-Hop 算法误差分析

该算法的误差主要来源于两个方面。其中一部分误差来自信标节点的平均距离,如图 1 所示, A1、A2、A3 为信标节点, U 表示未知节点, 依据(1)式可得信标节点 A1 的平均跳距为 $H_{A1} = 30$ m, 则 A1 到 U 之间的距离为 $D_{A1U} = 30$ m, A1 与 U 之间的实际距离为 5 m, 利用信标节点估算得到的平均距离比实际距离大 25 m, 计算误差太大。

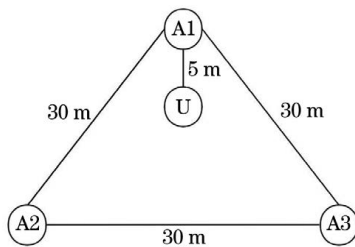


图 1 节点位置示意图

Fig. 1 Node position

另一部分误差来自节点之间跳数的计算。在信标节点通信范围内,某些节点与信标节点的距离很近,有些节点与信标节点的距离很远,但是不论距离

远近,跳数全部记为 1 跳,这样计算出的跳数会引起很大的误差。因此文献[11]引入双通信半径来细化跳数,进而减小误差。

3 改进 DV-Hop 算法

本文在经典 DV-Hop 算法的基础上进行改进。首先通过多通信半径的方式细化跳数,然后通过引入修正因子对跳数进行二次优化;再使用最小均方误差准则计算信标节点之间的平均跳距;在对未知节点坐标进行估计时,先使用加权的方式优化信标节点与未知节点之间的平均跳距,再使用加权最小二乘法对未知节点进行坐标定位,以减小误差。

3.1 改进最小跳数

首先使用多通信半径方式细化跳数。设信标节点最大通信半径为 R , 将信标节点最大通信范围划分为 n 个同心圆, 信标节点则有多个通信半径: $R/n, R/(n-1), \dots, R$ 。信标节点首先以半径 R/n 向网络广播数据, 记录监测到的未知节点信息, 过段时间后再以半径 $R/(n-1)$ 、以同样方式广播数据并监测未知节点信息, 直至最终以 R 半径广播数据^[17]。通过不同半径细化后信标节点检测的通信范围为

$$\begin{cases} 0 < D_i \leq \frac{R}{n} \\ 0 < D_i \leq \frac{R}{n-1}, \\ \vdots \\ 0 < D_i \leq R \end{cases}, \quad (10)$$

式中: D_i 表示未知节点 i 到信标节点的距离。原则上, n 越大, 则细化程度越高, 定位精度越高, 但是与之相伴的是能耗增大, 所以综合考虑节点定位精度与使用寿命, n 取值不宜太大。图 2 所示为 $n=3$ 的情况。

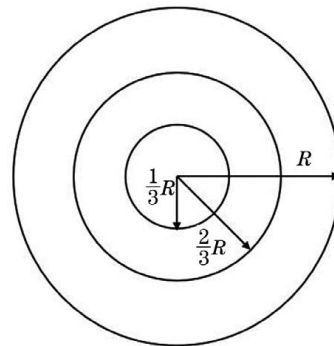


图 2 多通信半径示意图

Fig. 2 Multiple communication radii

细化跳数之后,通过引入修正因子对跳数进行二次修正。令信标节点间的距离与其通信半径之间的比值为理想跳数,用 H 表示,令信标节点间的距离为 d 、通信半径为 R ,则理想跳数可表示为

$$H = \frac{d}{R}. \quad (11)$$

令多通信半径细化后的跳数为估计跳数,用 h 表示,令估计跳数与理想跳数的差值与估计跳数的比值为偏离因子,显然当偏离因子越大时,所产生的误差也就越大。令 δ 表示偏离因子,则有

$$\delta = \frac{h - H}{h}. \quad (12)$$

至此,引入修正因子 $\mu = 1 - \delta^2$,用该因子对信标节点跳数进行二次修正^[18],修正后的跳数为

$$h' = \mu h. \quad (13)$$

3.2 改进信标节点平均跳距

经典的 DV-Hop 算法根据无偏估计准则计算信标节点之间的平均跳距,即以(1)式计算平均跳距^[19]。然而有研究者提出误差在一般情况下具有服从高斯分布的特性,基于参数估计理论,使用均方误差更为合理,所以本文基于最小均方误差准则对信标节点间的平均跳距进行求解,得到平均跳距为

$$H_i = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij} \times d_{ij}}{\sum_{j=1}^n h_{ij}^2}, \quad (14)$$

式中: h_{ij} 表示经两次修正后的信标节点之间的跳数; d_{ij} 表示两个不同信标节点之间的距离。由(14)式得到

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (i \neq j). \quad (15)$$

3.3 求未知节点平均跳距

经典的 DV-Hop 算法中,未知节点通过寻找离自己位置最近的信标节点接收平均跳距信息,然后将平均跳距与未知节点到各信标节点的跳数相乘,即得到该未知节点到各信标节点的跳段距离。但是距离信标节点跳数越远,定位误差就会越大。针对定位误差较大的问题,可以使用加权的方式,其主要思想就是弱化可能会产生较大误差的节点的影响,距离近的节点权重重大,距离远的节点权重小,如此便可减小误差^[20]。实际应用中,权系数可表示为

$$w_i = \frac{1}{h_i}, \quad (16)$$

式中: h_i 表示信标节点 i 到未知节点的跳数。由此便可求得未知节点的加权平均跳距为

$$a_H = \sum_{i=1}^n w_i \times H_i, \quad (17)$$

之后便可利用(17)式估算未知节点与信标节点之间的距离,从而估算出未知节点坐标。

3.4 加权最小二乘法

经典的 DV-Hop 算法常使用最小二乘法来估算未知节点坐标,该算法的优点在于简单,且易于实现。但是最小二乘法也有很明显的缺点,即未考虑测量信息,使得其估计精度不高。然而对其进行加权之后,精度会有显著提升。

引入权重矩阵 \mathbf{W} ,对于某未知节点 k ,其与信标节点之间的最小跳数的权重矩阵为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{k,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{k,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{k,n-1} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中: $w_{k,i}$ 表示未知节点 k 与信标节点 i 的权值,可定义为

$$w_{k,i} = \frac{1}{h_{ki}}, \quad (19)$$

式中: h_{ki} 表示未知节点 k 到信标节点 i 的最小跳数。加权最小二乘估计的优化规则^[21]为

$$\min [\mathbf{W}(\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{X})]^T [\mathbf{W}(\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{X})]. \quad (20)$$

结合(4)~(6)式,对 \mathbf{X} 求偏导,并令其值为零,可得 \mathbf{X} 的加权估计值为

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{B}. \quad (21)$$

4 仿 真

本文采用 MATLAB R2019a 软件进行仿真,并对仿真结果进行分析。仿真环境为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的正方形区域,在仿真区域内随机分布 100 个节点。仿真主要包括两部分:在区域内节点总数固定的情况下,当信标节点通信范围一定时,观察信标节点个数对定位精度的影响;在信标节点个数固定的情况下,观察信标节点通信范围对于定位精度的影响。在本文中,多通信半径个数 $n=3$,将本文提出的 WOA-DV-Hop 算法与 DV-Hop 算法、文献[11]提出的双通信半径 DV-Hop 算法(IDV-Hop-DCR)、文献[22]提到的 3-DV-Hop 算法进行对比。

使用定位误差评价算法的性能。定位误差值越小,说明定位精度越高,定位的可靠性越高。定位误

差可表示为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2}}{NR}, \quad (22)$$

式中: N 表示未知节点的个数; (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 表示未知节点的估计坐标; (x_i, y_i) 表示未知节点的实际坐标; R 表示信标节点的最大通信半径。为了保证算法的稳定性与可靠性, 每种算法将会循环多次, 求取其平均值进行比较。

首先分析在信标节点最大通信半径一定的情况下, 信标节点数量对于定位精度的影响。仿真环境设定信标节点的最大通信半径为 40 m, 信标节点数量分别取 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40。如图 3 所示, 随着信标节点数量的增加, 定位精度不断提高, 同时从图中可以看到, 在信标节点个数大于 25 后, 定位误差降低的趋势放缓。本文提出的 WOA-DV-Hop 算法相比于 DV-Hop 算法、IDV-Hop-DCR 算法和 3-DV-Hop 算法, 定位精度分别提升约 62.8%、39.7%、12.7%。

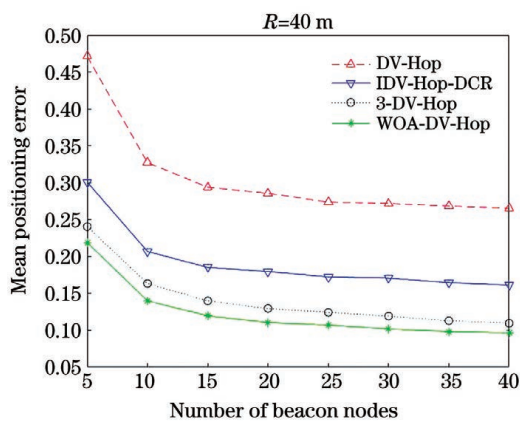


图 3 定位误差与信标节点数的关系

Fig. 3 Relationship between positioning error and beacon nodes

然后分析在信标节点数量一定的情况下, 信标节点的最大通信半径与定位精度之间的关系。仿真环境设定信标节点数量为 10, 未知节点数量为 90, 信标节点的最大通信半径的取值分别为 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 m。其中信标节点个数为 10 的仿真环境如图 4 所示。图 5 为仿真结果, 从图中可以看到随着信标节点数的增多, 定位误差显著减小, 而且下降趋势放缓。本文提出的 WOA-DV-Hop 算法相比于 DV-Hop 算法、IDV-Hop-DCR 算法和 3-DV-Hop 算法, 定位精度分别提升约 58%、33%、14.8%。

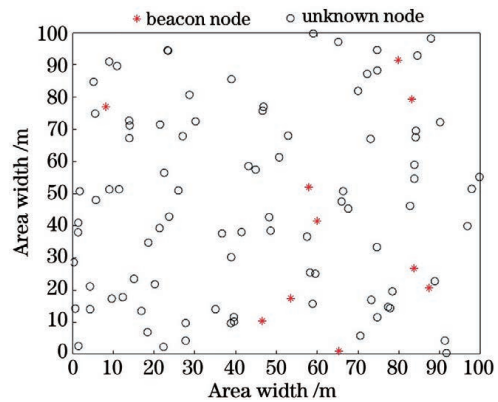


图 4 仿真环境

Fig. 4 Simulation environment

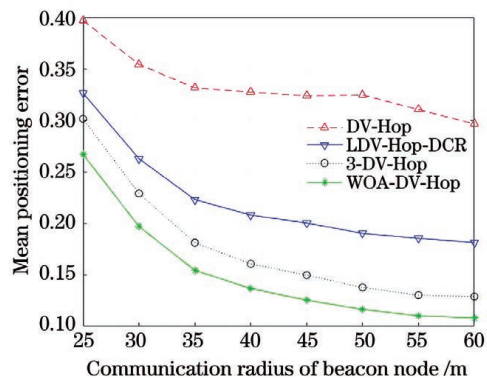


图 5 定位误差与信标节点通信半径的关系

Fig. 5 Relationship between positioning error and communication radius of beacon node

5 结 论

针对经典 DV-Hop 算法误差较大的问题提出的算法是在经典 DV-Hop 算法的基础上使用多通信半径方式细化跳数, 利用修正因子进行跳数优化, 进而利用最小均方误差准则计算信标节点间平均跳距, 再利用加权的方式对平均跳距进行优化, 最后使用加权最小二乘法对未知节点坐标进行定位。通过仿真表明本文提出的 WOA-DV-Hop 算法相较于经典的 DV-Hop 算法、IDV-Hop-DCR 以及 3-DV-Hop 算法, 在定位精度方面有很大的提升。但是引入多种方式对经典 DV-Hop 进行改进, 不可避免地增加了计算开销。

参 考 文 献

- [1] Kumar S, Lobiyal D K. An advanced DV-hop localization algorithm for wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 71 (2): 1365-1385.
- [2] Noel A B, Abdaoui A, Elfouly T, et al. Structural

- health monitoring using wireless sensor networks: a comprehensive survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1403-1423.
- [3] Nemer I, Sheltami T, Shakshuki E, et al. Performance evaluation of range-free localization algorithms for wireless sensor networks[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2021, 25(1): 177-203.
- [4] Gan Y, Cong X C, Sun Y M. Refinement of TOA localization with sensor position uncertainty in closed-form[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 390.
- [5] Qiao T Z, Redfield S, Abbasi A, et al. Robust coarse position estimation for TDOA localization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(6): 623-626.
- [6] Du J Z, Diouris J F, Wang Y D. A RSSI-based parameter tracking strategy for constrained position localization[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2017, 2017: 77.
- [7] Li H X, Yu D, Hu Y, et al. Improved trilateration centroid localization algorithm for wireless sensor network[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(6): 1216-1223.
李海啸, 于东, 胡毅, 等. 改进的无线传感器网络三边质心定位算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(6): 1216-1223.
- [8] Zhao X Q, Wang W. Iterative centroid localization algorithm based on received signal strength indication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0328005.
赵晓倩, 王伟. 基于接收信号强度指示的回信迭代定位算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0328005.
- [9] Ren K Q, Deng L. Improved DV-Hop algorithm based on global hop count optimization and hop distance error correction [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(3): 438-443.
任克强, 邓浪. 全局跳数优化与跳距误差修正的 DV-Hop 改进算法[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(3): 438-443.
- [10] Yin W J. Improved APIT localization algorithm based on WSN [J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2018, 18(4): 20-23, 58.
殷万君. WSN 定位算法 APIT 的改进型设计[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2018, 18(4): 20-23, 58.
- [11] Li T C, Wang C Z, Na Q. Research on DV-Hop improved algorithm based on dual communication radius[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 2020(1): 1-10.
- [12] Qiu Y, Ni X J. Optimizing DV-Hop localization algorithm with Newton's method[J]. *Computer Era*, 2020(9): 29-33.
仇莹, 倪晓军. 基于牛顿迭代法的 DV-Hop 改进定位算法[J]. *计算机时代*, 2020(9): 29-33.
- [13] Li Q, Huang X, Shen D, et al. Improved DV-Hop ranging-based dynamic parameters differential evolution localization algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0628001.
李强, 黄霞, 申东, 等. 基于 DV-Hop 测距修正的动态调参差分进化定位算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0628001.
- [14] Liu Y, Gao L. Optimized DV-hop localization algorithm based on improved artificial bee colony[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 192023.
刘燕, 高丽. 改进的人工蜂群优化 DV-Hop 定位算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 192023.
- [15] Cai X J, Wang P H, Cui Z H, et al. Weight convergence analysis of DV-hop localization algorithm with GA[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(23): 18249-18258.
- [16] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in Ad hoc networks [J]. *Journal of Telecommunication system*, 2003, 22(1-4): 267-280.
- [17] Ye J. Research on range-free location algorithms in wireless sensor networks [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2019.
叶娟. 无线传感器网络非测距定位算法研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2019.
- [18] Su Z S. Research and improvement of wireless sensor network localization algorithm [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019.
苏泽盛. 无线传感器网络定位算法研究及改进[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [19] Ma S L, Zhao J P. Improvement of DV-Hop algorithm in wireless sensor networks[J]. *Communications Technology*, 2015, 48(7): 840-844.
马淑丽, 赵建平. 无线传感器网络中 DV-Hop 定位算法的改进[J]. *通信技术*, 2015, 48(7): 840-844.
- [20] Liu S X, Huang J J, Liu H Y, et al. An improving DV-Hop algorithm based on multi communication radius[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(6): 883-887.
刘士兴, 黄俊杰, 刘宏银, 等. 基于多通信半径的加权 DV-Hop 定位算法[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(6): 883-887.
- [21] Ren K Q, Liao M Y. Improved DV-Hop node localization algorithm based on hop count classification [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(10): 1565-1571.

- 任克强, 廖美焱. 基于跳数分类的改进 DV-Hop 节点定位算法 [J]. 传感技术学报, 2017, 30(10): 1565-1571.
- [22] Ma S L, Zhao J P. Multi communication ranges DV-Hop localization algorithm for wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(4): 593-600.
- 马淑丽, 赵建平. 多通信半径的无线传感器网络 DV-Hop 定位算法 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(4): 593-600.