

6-8-2020

## Improved DV-Hop Localization Algorithm Based on Average Hopping Distance and Position Optimization

Zhipu Zhao

*Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Wu Dong

*Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Wang Yan

*Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Zhicheng Ji

*Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Improved DV-Hop Localization Algorithm Based on Average Hopping Distance and Position Optimization

### Abstract

**Abstract:** To overcome the low positioning accuracy caused by the imprecise estimated distance and the accumulative location error, an improved DV-Hop localization algorithm based on Wireless Sensor Network was proposed. *This method, taking the summation of the beacon node average jump distance based on the weighted error correction as its average distance, was used to reduce the average jump distance error. Besides, an improved least square method was used to process the accumulative location error.* The simulation results show that the improved localization algorithm performs greatly better, both in distance estimation and positioning accuracy, than the traditional DV-Hop localization algorithm, DV-Hop algorithm of weighted least squares and the improved DV-HOP positioning algorithm based on one-hop subdivision and average hopping distance modification.

### Keywords

wireless sensor networks, DV-Hop algorithm, node localization, distance estimation, least square method

### Recommended Citation

Zhao Zhipu, Wu Dong, Wang Yan, Ji Zhicheng. Improved DV-Hop Localization Algorithm Based on Average Hopping Distance and Position Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(6): 1273-1280.

# 基于平均跳距和位置优化的改进 DV-Hop 定位算法

赵芝璞, 吴栋, 王艳, 纪志成

(江南大学电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针对 DV-Hop 算法在定位过程中因存在平均每跳距离误差大以及误差累积而导致定位精度不高的问题, 提出了基于无线传感器网络的改进 DV-Hop 定位算法。该算法对接收的多个锚节点的跳距进行加权求和来减少平均每跳距离的误差, 并且利用改进的最小二乘方法来解决误差累积的问题。通过 MATLAB 对改进的 DV-Hop 算法进行仿真, 实验结果表明, 相比于传统的 DV-Hop 算法、加权最小二乘的 DV-Hop 算法和基于 RSSI 每跳分级和跳距修正的算法, 改进的算法在距离估计和定位精度方面有了很大的提高。

**关键词:** 无线传感器网络; DV-Hop 算法; 节点定位; 距离估计; 最小二乘

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 06-1273-08

## Improved DV-Hop Localization Algorithm Based on Average Hopping Distance and Position Optimization

Zhao Zhipu, Wu Dong, Wang Yan, Ji Zhicheng

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** To overcome the low positioning accuracy caused by the imprecise estimated distance and the accumulative location error, an improved DV-Hop localization algorithm based on Wireless Sensor Network was proposed. This method, taking the summation of the beacon node average jump distance based on the weighted error correction as its average distance, was used to reduce the average jump distance error. Besides, an improved least square method was used to process the accumulative location error. The simulation results show that the improved localization algorithm performs greatly better, both in distance estimation and positioning accuracy, than the traditional DV-Hop localization algorithm, DV-Hop algorithm of weighted least squares and the improved DV-HOP positioning algorithm based on one-hop subdivision and average hopping distance modification.

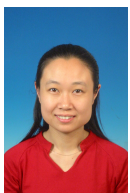
**Keywords:** wireless sensor networks; DV-Hop algorithm; node localization; distance estimation; least square method

## 引言

近年来,无线传感器网络已经吸引了国内外研究的兴趣。无线传感器网络在室内物体跟踪<sup>[1]</sup>、安

全监控<sup>[2]</sup>等领域已经有了广泛的应用。节点定位是实现传感器网络应用的提前之一<sup>[3]</sup>。节点的位置信息是不确定的,只有确定了节点的位置之后,借助于传感器节点采集到的信息才有应用的价值。

目前的无线传感器网络定位算法主要分为 2 类: 基于测距(range-based)的定位算法和基于非测距(range-free)的定位算法<sup>[4]</sup>。在测距定位算法中,到达时间(time of arrival, TOA)、到达时间差(time



收稿日期: 2015-10-29 修回日期: 2015-12-22;  
基金项目: 国家自然科学基金(61572238), 国家 863 计划(2014AA041505);  
作者简介: 赵芝璞(1976-), 女, 江苏常州, 讲师, 研究方向为控制工程与应用; 吴栋(1989-), 男, 江苏南通, 硕士, 研究方向为控制理论与控制工程。

<http://www.china-simulation.com>

• 1273 •

difference of arrival, TDOA)、到达角(arrival of angle, AOA)、接收信号强度指示值(Received Signal Strength Indicator, RSSI)是主要的测距技术。非测距定位算法主要包括质心定位算法、近似三角形内点测试法(Approximate Point-In-Triangulation Test, APIT)、DV-Hop 算法等。DV-Hop 是非测距算法中应用最广泛的算法之一。

针对 DV-Hop 算法在节点随机分布的网络环境中定位误差大的问题,已经取得了一些研究成果。文献[5]中采用了 RSSI 测距技术来测量未知节点到一跳锚节点的距离,从而减小测距的误差,并且利用了 2-D Hyperbolic 算法来估计未知节点的位置;文献[6]提出了锚节点的信任度来判别锚节点在未知节点定位过程中的可信任程度,并且利用加权的最小二乘法估算未知节点的坐标;文献<sup>[7]</sup>提出了 RSSI 每跳分级的思想来修正节点之间的跳数从而减少平均每跳距离的误差。

然而文献[5-7]通过增加节点的计算开销、通信开销来提高定位精度;文献[6]使用的加权最小二乘法的权值还没用让节点定位达到最优。针对上述文献的缺陷,本文提出了基于无线传感器网络的改进 DV-Hop 定位算法,对接收的多个锚节点的跳距进行加权求和来减少平均每跳距离的误差,并且利用改进的最小二乘法来解决误差累积的问题,最后用 MATLAB 对相关算法进行了模拟对比的实验。实验结果表明,本文改进的 DV-Hop 算法不仅减少了测距误差,而且提高了定位精度。

## 1 DV-Hop 算法基本原理

### 1.1 DV-Hop 算法步骤介绍

Dragos Niculescu<sup>[8]</sup>等把 GPS 的定位思想和距离矢量路由的思想相结合提出了 6 种分布式的定位算法,主要有 DV-Coordinate, DV-Bearing, DV-Hop, DV-Distance, DV-Radial 和 Euclidean 算法,统一称为 APS(Ad Hoc Positioning System)。其中 DV-Hop 定位算法是分布式定位算法中应用最广泛的算法之一,利用距离矢量的跳段机制实现节

点的定位,无需使用额外的硬件设备。DV-Hop 算法的实现主要分为 3 个步骤。

步骤 1: 计算节点之间的最小跳数

在网络初始化之后,网络的锚节点广播自身信息的数据包  $\{ID, (x, y), hop\}$  给相邻的节点,并且通过典型的距离矢量的交换协议,获得所有节点到锚节点的最小跳数。

步骤 2: 估计未知节点平均每跳的距离

每个锚节点利用获得的其他锚节点的位置坐标和对应的跳数信息,计算出平均每跳的距离,如公式(1)所示:

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

式中:  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$  分别表示锚节点  $i, j$  的坐标,  $hop_{ij}$  表示锚节点  $i$  与锚节点  $j$  之间的最小跳数,  $m$  表示网络中的锚节点总数。

锚节点在网络中广播自身的平均每跳距离,未知节点接收且记录接收的第一个平均每跳距离,未知节点继续转发该跳距。利用公式(2)计算节点之间的估计距离

$$d = H_i h \quad (2)$$

式中:  $d$  为节点的估计距离,  $H_i$  为平均每跳的距离,  $h$  为节点之间的跳数。

步骤 3: 计算未知节点的位置

未知节点获取到锚节点的估计距离和位置信息之后,对于每个锚节点可以得到方程(3)

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = d_i^2 \quad (3)$$

未知节点获取到  $m$  个锚节点的信息之后,就可以得到含有  $m$  个方程的线性方程组。利用最大似然估计法可以估算出未知节点的坐标。

### 1.2 DV-Hop 算法的不足

在 DV-Hop 算法中,在上述步骤 2 计算平均每跳距离的计算方法误差较大。实际中不规则的拓扑结构,各处不一致的平均每跳的距离,某一锚节点平均每跳的距离在整个 WSN 中不试用。

在 DV-Hop 算法中, 通常采用极大似然估计方法或者三边测量方法求得未知节点和锚节点的估计距离。三边测量法可以避免迭代的运算, 降低了定位算法的复杂程度, 然而对选择锚节点的要求比较高。若挑选的三个锚节点在一条直线上, 那么无法实现未知节点的定位; 若挑选的三个锚节点的各自平均每跳的距离较大则节点相对分布分散, 那么定位误差也会比较大。所以, 利用三边测量方法求解得到的待定位节点的位置误差比较大。若运用极大似然估计方法求解, 根据  $AX = b$  计算公式可以看出, 公式中的矩阵  $A$  和对应的矩阵  $b$  的误差都会影响定位的误差。

所以, 如何选择 DV-Hop 定位算法中平均每跳距离和节点位置的计算方法是当前需要解决的问题。

## 2 本文改进的 DV-Hop 算法

针对传统的 DV-Hop 算法在定位过程中存在平均每跳距离误差大以及误差累积的问题, 本文做了如下的改进: (1) 对接收的多个锚节点的跳距进行加权求和来减少平均每跳距离的误差; (2) 利用改进的最小二乘方法来解决误差累积的问题。

### 2.1 节点平均跳距的修正

在经典的 DV-Hop 算法中, 未知节点平均每跳的距离和对应锚节点之间最小跳数的乘积即为它们之间的欧式距离。利用相同方法计算锚节点之间的估计距离, 对应的距离误差  $\varepsilon_{ij}$  用公式(4)表示为:

$$\varepsilon_{ij} = d_{ij} - Hopsiz_e_i \times hop_{ij} \quad (4)$$

锚节点的位置一定, 因而锚节点之间的距离  $d_{ij}$  和最小跳数  $hop_{ij}$  是常数。从公式(4)中可以看出, 平均每跳的距离  $Hopsiz_e_i$  越精确, 误差  $\varepsilon_{ij}$  越小。 $\varepsilon_{ij}$  在一般情况下服从高斯分布, 可以采用均方误差作为目标函数, 通过求解均方误差的最小值来得锚节点的平均每跳距离。也即

$$f = \frac{\sum_{i \neq j} \varepsilon_{ij}^2}{n-1} = \frac{\sum_{i \neq j} (d_{ij} - Hopsiz_e_i * hop_{ij})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i \neq j} (d_{ij}^2 - 2d_{ij} * Hopsiz_e_i * hop_{ij} + Hopsiz_e_i^2 * hop_{ij}^2)}{n-1} \quad (5)$$

$$\text{令 } \frac{\partial f}{\partial Hopsiz_e_i} = 0 \quad (6)$$

由公式(5), (6)以及偏导数的原理, 可以求解得到

$$Hopsiz_e_i = \frac{\sum_{i \neq j} (hop_{ij} * d_{ij})}{\sum_{i \neq j} hop_{ij}^2} \quad (7)$$

对公式(5)求二阶偏导数可以得到

$$\frac{\partial^2 f}{\partial (Hopsiz_e_i)^2} = 2hop_{ij} > 0 \quad (8)$$

因此可以得出这样的结论: 当锚节点使用公式(7)求得平均每跳的距离时, 其对应的欧式距离和实际距离的误差  $\varepsilon_{ij}$  最小, 根据公式(7)求得的锚节点的平均每跳距离更精确。

在经典的 DV-Hop 算法中, 未知节点接收最近锚节点的平均每跳距离视为自己的平均跳距值, 但是这种确定未知节点平均跳距的策略存在着以下问题: (1) 网络中锚节点的平均跳距信息被浪费了好多, 并且未知节点最近一个锚节点的平均跳距无法反映所要定位未知节点周围的整个平均跳距的情况, 影响了未知节点定位的准确性; (2) 如果锚节点本身的平均每跳的距离误差较大, 并且距离需要定位的未知节点最近, 那么未知节点采用该锚节点的平均每跳的距离计算距离会存在误差的积累, 导致定位误差更大。

为了解决上述问题, 本文改进算法利用未知节点附近的几个锚节点的平均每跳距离得到该未知节点的平均每跳的距离, 如图 1(b)所示。在图 1 中, 空心点  $M$  表示未知节点, 实心点表示锚节点。首先锚节点离未知节点越近, 则越能反映未知节点的平均每跳的距离, 其次未知节点还要考虑附近未知节点锚节点的平均每跳距离的误差, 保证平均每跳距离误差越小的锚节点对未知节点的平均每跳距离影响越大。

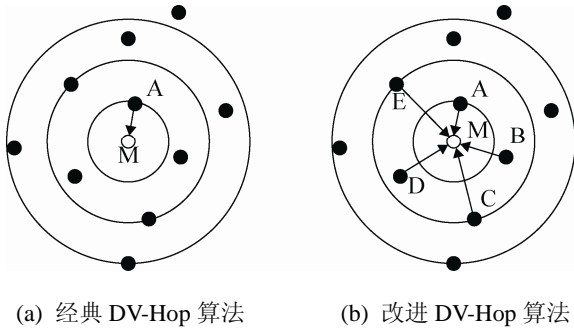


图 1 未知节点的平均每跳距离接收原理示意图

本文改进算法对未知节点平均每跳距离的修正步骤如下。

(1) 首先根据公式(7)计算出锚节点的平均每跳距离, 再根据公式(9)计算出锚节点的平均每跳距离的误差

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{i \neq j}^n (|d_{ij} - Hopsize_i \times hop_{ij}| / hop_{ij})}{n-1} \quad (9)$$

(2) 未知节点接收附近  $N$  个锚节点平均每跳的距离  $Hopsize_i$ , 并且对  $Hopsize_i$  做加权处理, 权值  $w_i$  的计算如公式(10)所示。

$$w_i = \frac{\frac{1}{\varepsilon_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\varepsilon_i}} \quad (10)$$

由公式(10)可以看出, 锚节点的权值  $w_i$  和它本身平均每跳距离的误差  $\varepsilon_i$  有关, 平均每跳的误差  $\varepsilon_i$  越小的锚节点, 其对应的权值越大, 对未知节点的平均每跳距离的计算影响越大。

(3) 计算未知节点  $M(x, y)$  平均每跳的距离, 如公式(11)所示。

$$Hopsize_M = \sum_{i=1}^N w_i \times Hopsize_i \quad (11)$$

## 2.2 未知节点坐标位置的优化

在求未知节点的坐标时, 经常使用的节点定位算法有最小二乘法<sup>[9]</sup>、加权最小二乘法<sup>[6]</sup>等, 最小二乘法未顾及到网络中的不同节点在递增方法中具有不同的误差, 加权最小二乘法虽然顾及了网络中的不同节点具有不同的误差, 但是其使用的权值

还没有获得最优的未知节点的估计位置。

假设无线传感器网络中  $O_i(X_{O_i}, Y_{O_i})$  为零级节点(锚节点)的坐标,  $A(X_A, Y_A)$  为一级节点(根据锚节点定位的节点), 未知节点  $A$  和零级节点  $O_i$  的距离  $d_{O_i}$ , 并且测量的距离误差  $\varepsilon_{i1}$  和  $d_{O_i}$  成比例, 服从高斯分布, 建立方程组如公式(12)所示。

$$\begin{cases} d_{O_1}^2 = (X_{O_1} - X_A)^2 + (Y_{O_1} - Y_A)^2 + \varepsilon_{11} \\ d_{O_2}^2 = (X_{O_2} - X_A)^2 + (Y_{O_2} - Y_A)^2 + \varepsilon_{21} \\ \vdots \\ d_{O_N}^2 = (X_{O_N} - X_A)^2 + (Y_{O_N} - Y_A)^2 + \varepsilon_{N1} \end{cases} \quad (12)$$

方程组(12)的第一个方程开始分别减去最后一个方程, 可以得出方程(13)

$$AH + V = B \quad (13)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} 2(X_{O_1} - X_{O_N}) & 2(Y_{O_1} - Y_{O_N}) \\ 2(X_{O_2} - X_{O_N}) & 2(Y_{O_2} - Y_{O_N}) \\ \vdots & \vdots \\ 2(X_{O_{N-1}} - X_{O_N}) & 2(Y_{O_{N-1}} - Y_{O_N}) \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} -(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{N1}) \\ -(\varepsilon_{21} - \varepsilon_{N1}) \\ \vdots \\ -(\varepsilon_{(N-1)1} - \varepsilon_{N1}) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} (X_{O_1}^2 - X_{O_N}^2) + (Y_{O_1}^2 - Y_{O_N}^2) - (d_{O_1}^2 - d_{O_N}^2) \\ (X_{O_2}^2 - X_{O_N}^2) + (Y_{O_2}^2 - Y_{O_N}^2) - (d_{O_2}^2 - d_{O_N}^2) \\ \vdots \\ (X_{O_{N-1}}^2 - X_{O_N}^2) + (Y_{O_{N-1}}^2 - Y_{O_N}^2) - (d_{O_{N-1}}^2 - d_{O_N}^2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

求得未知节点的解为

$$\hat{H} = (A^T W A)^{-1} A^T W B \quad (15)$$

可以得到  $E(\hat{H})$  和  $E[H]$  一般不相等, 所示上述解一般不是最优的无偏估计解。

针对上述问题引入了改进的加权最小二乘法来估算未知节点的坐标。主要思想是寻找到最优的权值  $W$ , 不仅使得方差矩阵  $E[(\hat{H} - H)(\hat{H} - H)^T]$  值最小, 而且使对未知节点的估计为无偏的估计。详细的推导过程如下所示。

未知节点的估计误差如公式(16)所示

$$\begin{aligned} \hat{H} - H &= (A^T W A)^{-1} A^T W B - H = \\ (A^T W A)^{-1} A^T W (A H + V) - H &= \\ ((A^T W A)^{-1} A^T W A - I) H + (A^T W A)^{-1} A^T W V \end{aligned} \quad (16)$$

假设

$$(A^T W A)^{-1} A^T W = P \quad (17)$$

将公式(17)代入公式(16)可以得到

$$\begin{aligned} E[(\hat{H} - H)(\hat{H} - H)^T] &= \\ (P A - I) E(H H^T) (P A - I)^T + P E(V V^T) P \end{aligned} \quad (18)$$

由于  $W > 0$ , 而且  $(A^T A)$  可逆, 可以得到

$$P A = I \quad (19)$$

$$\text{假设: } E(V V^T) = D(V) = M \quad (20)$$

由公式(18)~(20)可以推导出

$$\begin{aligned} E[(\hat{H} - H)(\hat{H} - H)^T] &= P M P^T = \\ (A^T W A)^{-1} A^T W M W A (A^T W A)^{-1} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{令 } \frac{\partial E[(\hat{H} - H)(\hat{H} - H)^T]}{\partial W} = 0 \quad (22)$$

由西瓦兹不等式可以求出最优的权值为

$$W = M^{-1} \quad (23)$$

由公式(14)-(23)可以求出未知节点的解为

$$\hat{H} = (A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} B \quad (24)$$

又因为

$$\begin{aligned} E(\hat{H}) &= E[(A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} B] = \\ E[(A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} (A H + V)] &= \\ E[H] \end{aligned} \quad (25)$$

所以  $\hat{H}$  为未知节点的最优无偏估计解。

### 2.3 算法描述

首先用流程图形象描述了改进 DV-Hop 算法, 如图 2 所示:

改进 DV-Hop 算法步骤:

Step 1: 锚节点  $i$  在网络中广播包含自己信息的数据包  $\{ID_i, (x_i, y_i), hop\}$ , 并且初始化<sup>[10]</sup>最小跳数  $hop = 0$ ;

Step 2: 网络中的未知节点和其他锚节点接收数据包, 接收数据包之后,  $hop$  值会做相应的更新, 并且以同样的方式继续转发该数据包, 直到网络中的所有节点获得和锚节点  $i$  的最小跳数信息;

Step 3: 锚节点根据 2.1 节中提出的锚节点平均跳距修正的计算方法分别计算自身平均每跳的距离和平均每跳距离的误差, 详细的计算步骤见公式(7)~(9);

Step 4: 未知节点 2.1 节提出的未知节点平均跳距修正的计算方法计算自身平均每跳的距离  $Hopsizem$ , 详细的计算步骤见公式(10)~(11)。

Step 5: 未知节点根据 Step4 中求得的平均每跳的距离  $Hopsizem$  和 Step2 中求出的最小的跳数信息估算到锚节点的距离;

Step 6: 未知节点利用 2.2 节提出的优化的加权最小二乘法计算自身的坐标, 详细的计算步骤见公式(14)~(24)。

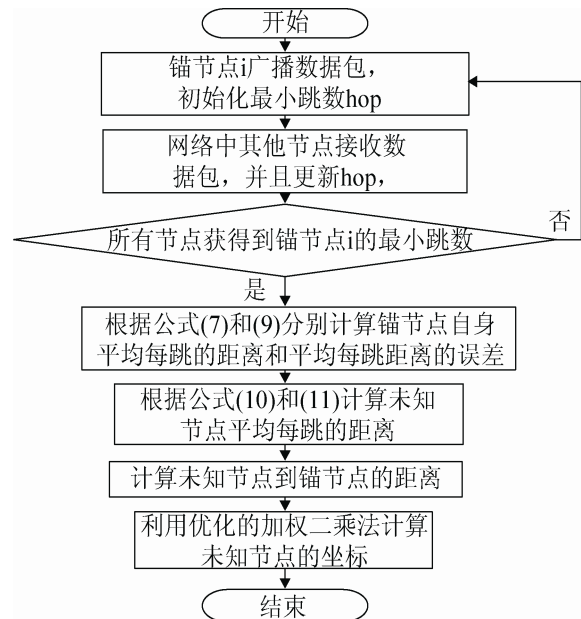


图 2 改进 DV-Hop 算法流程图

### 3 仿真结果

为了验证本文改进算法定位的性能, 利用 MATLAB 对经典的 DV-Hop 算法、文献[6]算法、文献[7]算法和本文改进的算法进行仿真分析。

### 3.1 算法环境和参数的选择

本文的网络环境为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的正方形区域, 随机分布 100 个节点, 形成本文无线传感器网络的拓扑结构<sup>[11]</sup>。其中,  $(x_{ir}, y_{ir})$  为未知节点的实际坐标,  $(x_{ie}, y_{ie})$  为未知节点的估计坐标,  $R$  为节点的通信半径,  $N$  为节点总数,  $N_a$  为锚节点个数,  $K$  为算法运行的次数,  $e$  为未知节点定位的平均相对误差,  $\bar{e}$  为未知节点定位的归一化误差,  $\hat{d}_i$  为未知节点和锚节点之间的估计距离,  $d_i$  为未知节点和锚节点之间的期望距离,  $e_M$  为未知节点的归一化误差均值。

### 3.2 算法的性能分析

#### 3.2.1 定位精度的比较

在实验 1 中, 通过设定不同锚节点个数(节点总数相同, 也即设定不同的锚节点比例), 来比较经典的 DV-Hop 算法、文献[6-7]算法以及本文改进的 DV-Hop 算法未知节点定位的平均相对误差和归一化误差。未知节点定位的平均相对误差和归一化误差计算公式见式(26)~(27)。

$$e = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{ir} - x_{ie})^2 + (y_{ir} - y_{ie})^2}}{KN} \quad (26)$$

$$\bar{e} = \frac{e}{R} \quad (27)$$

图 3(a)和图 3(b)分别表示了通信半径  $R = 20$  和  $R = 40$  时, 经典的 DV-Hop 算法、文献[6-7]算法以及本文改进的 DV-Hop 算法的平均相对定位误差和锚节点个数的关系。

从图 3(a)和图 3(b)分别可以看出, 在节点通信半径一定时, 本文改进 DV-Hop 算法的平均相对定位误差要优于上述 3 种算法: 随着锚节点个数增加, 4 种算法的平均相对定位误差均有减小的趋势, 这是由于锚节点个数增加, 减少了节点之间的距离。对比图 3(a)和图 3(b)可以看出, 随着通信半径增大, 未知节点的平均相对误差会减少, 这是因为节点通信半径会影响节点之间的连通度, 也会影响节点之间的平均每跳距离和节点之间的跳数。

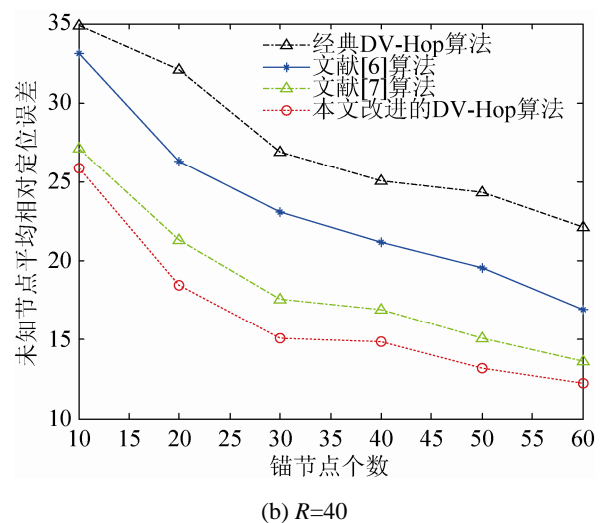
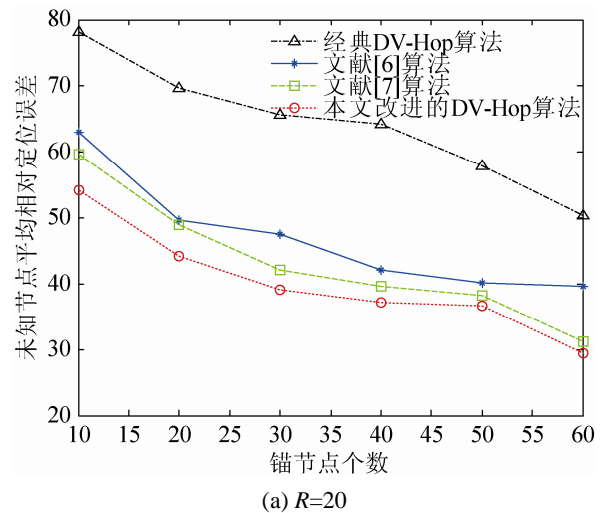
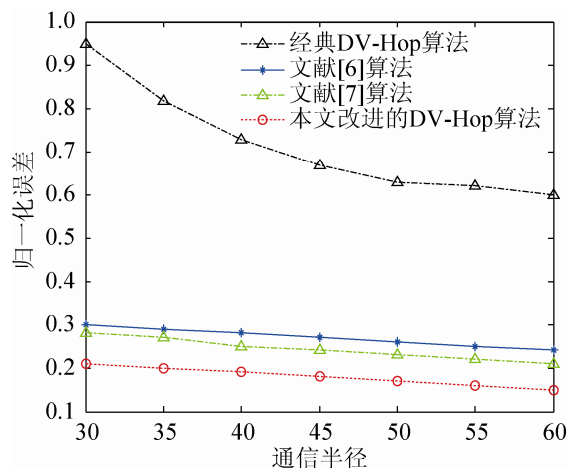


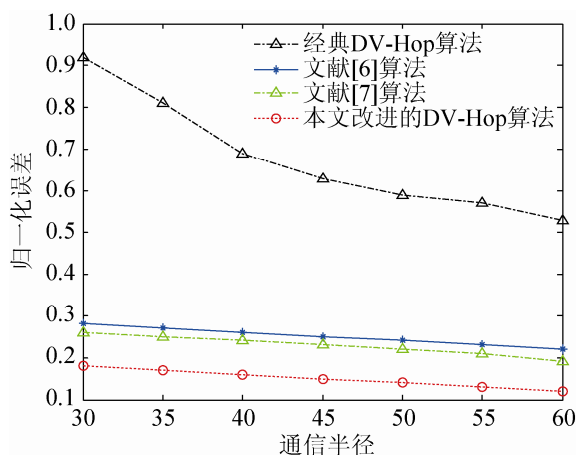
图 3 锚节点个数对平均相对定位误差的影响

图 4(a)和图 4(b)分别表示了锚节点个数  $N_a = 30$  和  $N_a = 50$  进行 500 次运算后的定位归一化误差对比曲线图。从图 4(a)和图 4(b)中分别可以看出, 在锚节点数一定的情况下, 当通信半径大于 45 m 时, 通信半径对 DV-Hop 影响较大, 而对其他 3 种算法影响较小, 这是由于文献[6-7]算法和本文算法修正了平均每跳的距离, 使节点的通信半径对平均每跳距离的影响减小。本文较经典的 DV-Hop 算法归一化误差下降了约 70%, 较文献[6-7]的算法归一化误差下降了约 10%。对比图 4(a)和图 4(b)可以看出, 随着锚节点个数的增加, 归一化误差会减少。综上可以得出本文改进算法的效果最好, 归一化误差得到了较大的降低, 定位精度有了很大的提高。





(a)  $N_a=30$



(b)  $N_a=50$

图 4 归一化误差和通信半径的关系

### 3.2.2 估计距离的比较

实验 2: 通过设定不同的节点间的跳数, 来观察 DV-Hop 算法、文献[6-7]算法以及本文改进算法估计距离的归一化误差均值和节点之间跳数的关系。估计距离的归一化误差均值计算公式如公式(28)所示:

$$e_M = \frac{\hat{d}_i - d_i}{R} \quad (28)$$

表 1 4 种算法的综合性能比较

平均性能	经典 DV-Hop 算法	文献[6]算法	文献[7]算法	本文改进的 DV-Hop 算法
定位精度	20%, 低	78%	78%	<b>88%, 高</b>
通信开销	$2 \times A \times N$	$3 \times A \times N$	$3 \times A \times N$	$3 \times A \times N$
计算开销	$(18k - 17 + 2^3 / 3) \times F$ , 中	$(18k - 17 + 2^3 / 3) \times F + E \times C \times F$ , 中	$(18k - 17 + 2^3 / 3) \times F + E \times C \times F$ , 中	$(20k + 2^3 / 3) \times F + E \times C \times F$ , 略高
硬件复杂度	无需额外硬件	无需额外硬件	无需额外硬件	无需额外硬件

图 5 给出了估计距离的归一化误差均值和节点间跳数的关系。从图 5 中可以看出, DV-Hop 算法、文献[6-7]算法的估计距离误差均不为 0, 说明上述 3 种算法的估计距离有较大的偏差。而本文改进算法估计距离的归一化误差近似等于零, 表明本文改进的算法的距离估计属于无偏估计, 改进效果最佳。

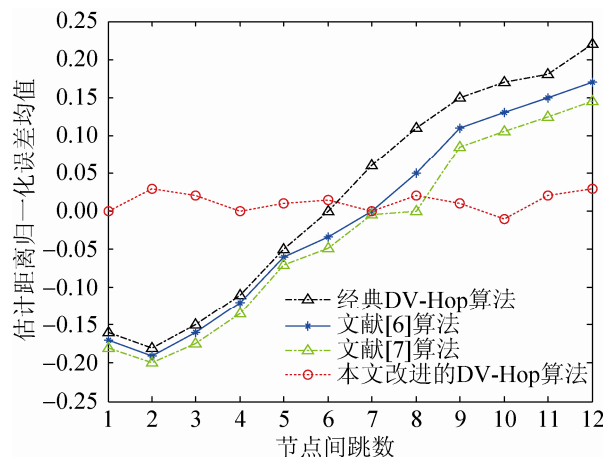


图 5 估距归一化误差均值和节点间跳数的关系

### 3.3 算法的复杂度分析

表 1 给出了经典 DV-Hop 算法、文献[6-7]算法以及本文改进算法的综合性能比较。从表 1 可以看出, 4 种算法均无需额外的硬件, 本文改进算法的计算开销略高于其他 3 种算法。本文改进的 DV-Hop 算法和经典的 DV-Hop 算法相比, 本文改进的 DV-Hop 以略高的通信开销和计算开销获得了较高的定位精度。本文改进算法和文献[6-7]中的算法相比, 本文改进算法以略高的计算开销获得了较高的定位精度。

## 4 结论

针对 DV-Hop 算法在定位的过程中出现平均每跳距离误差大和误差累积的问题, 本文提出了改进的 DV-hop 算法, 主要从 2 个方面进行改进。在定位过程中, 对于未知节点接收的多个锚节点的跳距采用加权求和的方式, 从而减少平均每跳距离的误差; 在估计未知节点坐标时, 利用优化的加权最小二乘法来解决误差累积的问题, 提高定位的精确性。仿真结果表明, 本文改进算法的定位精度要高于 DV-Hop 算法、文献[6-7]算法; 本文改进算法的归一化定位误差较 DV-Hop 算法下降了约 70%, 较文献[6-7]算法下降了约 10%; 本文改进算法的距离估计属于无偏估计。综上可知, 本文改进的 DV-Hop 算法在定位精度和距离估计均具有明显的优势。然后本文算法存在计算开销大的问题, 如何在减少估距误差和提高定位精度的同时, 减少计算开销, 增加本文算法的实用性, 将是以后研究的重点。

### 参考文献:

- [1] Lee B G, Chung W Y. Multitarget three-dimensional indoor navigation on a PDA in a wireless sensor network [J]. IEEE Sensors Journal (S1530-437X), 2011, 11(3): 799-807.
- [2] Zhang J, Song G, Qiao G, et al. An indoor security system with a jumping robot as the surveillance terminal [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics (S0098-3063), 2011, 57(4): 1774-1781.
- [3] Han G, Chao J, Zhang C, et al. The impacts of mobility models on DV-hop based localization in Mobile Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Network and Computer Applications (S1084-8045), 2014, 42(4): 70-79.
- [4] Zhao J, Zhao Q, Li Z, et al. An improved Weighted Centroid Localization algorithm based on difference of estimated distances for Wireless Sensor Networks [J]. Telecommunication Systems (S1018-4864), 2013, 53(1): 25-31.
- [5] 刘衍珩, 刘炳日, 孙大洋, 等. WSN 中一种 DV-Hop 定位精度改进算法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(3): 763-768.
- [6] 朱敏, 刘昊霖, 张志宏, 等. 一种基于 DV-HOP 改进的无线传感器网络定位算法 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(1): 93-98.
- [7] 张爱清, 叶新荣, 胡海峰, 等. 基于 RSSI 每跳分级和跳距修正的 DV-HOP 改进算法 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2552-2559.
- [8] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS)[C]// Global Telecommunications Conference. San Antonio, TX: IEEE, 2001: 2926-2931.
- [9] 魏全瑞, 刘俊, 韩九强. 改进的无线传感器网络无偏距离估计与节点定位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 1-6.
- [10] 祝宇鸿, 历彦恺, 胡俊. 基于跳数阈值和节点分类的 DV-Hop 改进算法 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(4): 407-412.
- [11] Xiang S, Zhang Y Z, Xia Zhijia, et al. An improved DV-Hop localization algorithm using residual weight in wireless sensor network [J]. Journal of Computational Information Systems (S1553-9105), 2012, 8(15): 6357-6364.
- [12] 贾兆红, 陈华平, 唐俊, 等. 面向多目标的自适应动态概率粒子群优化算法 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 4959-4963.
- [13] 刘长平, 叶春明. 具有混沌搜索策略的蝙蝠优化算法及性能仿真 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(6): 1183-1188, 1195.
- [14] 李士勇, 李盼池. 求解连续空间优化问题的量子粒子群算法 [J]. 量子电子学报, 2007, 24(5): 569-574.
- [15] 冯斌, 石锦风, 孙俊. 基于 QPSO 算法的作业车间调度问题的研究 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(23): 5690-5693, 5786.
- [16] 贾兆红, 陈华平, 孙耀晖. 混合粒子群算法在柔性生产车间调度中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(20): 4743-4747.

(上接第 1254 页)