

基于加权最小平方方法的 DV-Hop 改进算法

李长庚, 刘孟思, 孙克辉

(中南大学 物理与电子学院, 湖南 长沙 410012)

摘 要: DV-Hop 算法作为无线传感器网络定位中的经典算法, 具有成本低、易于实现的优势, 但是在定位精度方面存在一定的不足. 改进算法对利用三边法或极大似然估计法得到未知节点位置信息的第三步进行改进, 在求解方程组时采取平方后再相减的策略, 同时为了减小多跳产生的定位误差, 将跳数作为加权值, 并为其设计相应的加权矩阵, 采用加权最小平方方法求解方程组, 最后, 利用求解方程组时得到的冗余信息对未知节点的位置进行进一步的修正. 通过理论分析和实验仿真, 证明改进算法提高了定位精度, 减小了定位误差, 可更好地应用于实际场景.

关键词: 定位; DV-Hop 算法; 加权最小平方方法; 冗余信息

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)01-0024-04

Improved DV-Hop Localization Algorithm Based on the Weighted Least Square Method

LI Chang-geng, LIU Meng-si, SUN Ke-hui

(School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410012, China)

Abstract: DV-Hop algorithm is one of the classical localization algorithms in wireless sensor networks. It has a low cost and is easily implemented, but its precision is low. Based on the trilateral method or the maximum likelihood estimation method, the third step which is used to obtain the location of the unknown node is corrected. Subtraction after square is adopted when we solve the equation set in the third step. To improve the localization error due to more than one hop, we set the hop count as the weighted value, and then the resulting weighted matrix is designed. With the weighted least square method introduced, the location of unknown nodes is refined with the extraneous information obtained by solving the equations. The theoretical analysis and simulation results show that the improved method can effectively improve the positioning accuracy, and can also be applied in the actual scene.

Key words: localization; DV-Hop algorithm; weighted least square method; extraneous information

1 引言

无线传感器网络节点定位方法中的 DV-Hop 算法^[1]由于成本低且易于实现, 受到了学者的广泛关注. 研究者们基于 DV-Hop 算法进行了很多改进, 如: 利用平均跳数和平均误差来减小最终的定位误差^[2]; 减小未知节点平均跳距以减小累积误差^[3]; 将自适应人工蜂窝法与 DV-Hop 算法相结合, 实现对未知节点的定位^[4]; 利用量子行为粒子群优化算法对改进 DV-Hop 算法得到的估算位置进行校正^[5].

本文对算法的第三步(三边法或极大似然估计法得到未知节点位置)进行改进. 在求解方程组时不直接相减, 而是经平方后再相减, 同时引入加权最小平方法解方程组, 最后利用求解方程组时得到的冗余信息对未知节点的位置进行进一步的修正.

2 DV-Hop 算法描述

DV-Hop 算法可以分为三个部分.

(1) 计算节点之间的最小跳数

锚节点向邻居节点广播携带位置坐标和跳数的

信息数据包,如 (x_i, y_i, h_i) ,其中 (x_i, y_i) 是锚节点 i 的坐标, h_i 是锚节点距离其他节点的跳数,初始化为0.每个节点只接收来自其他锚节点的最小跳数,忽略来自同一个锚节点的较大跳数.

(2) 每个锚节点计算自己的平均跳距 hopsiz_{e_i} .

(3) 计算未知节点的坐标.

未知节点利用三边法或极大似然估计法得到未知节点的位置信息.计算方法如下:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_1 \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} = d_2 \\ \vdots \\ \sqrt{(x_M - x)^2 + (y_M - y)^2} = d_M \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 是未知节点的坐标, d_i 是相应的锚节点 i 与未知节点之间的距离.

未知节点的坐标可以通过下式得到,

$$\mathbf{X}^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (2)$$

式中,

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

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_n^2 - x_n^2 + x_n^2 - y_n^2 + y_n^2 \\ d_2^2 - d_n^2 - x_n^2 + x_n^2 - y_n^2 + y_n^2 \\ \vdots \\ d_{n-1}^2 - d_n^2 - x_n^2 + x_n^2 - y_n^2 + y_n^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}.$$

3 改进的 DV-Hop 算法

3.1 算法描述

在上节中, d_i 是按照原始的 DV-Hop 算法计算所得,由于使用的平均跳距存在误差,因此得到的距离也存在误差.本节中将前 $n-1$ 个方程分别减去第 n 个方程,然后平方,两边平方并简化,可获得如下方程组:

$$\begin{cases} -2(x_1 + x_n)x - 2(y_1 + y_n)y + 2k = d_1^2 + d_n^2 - (E_1 + E_n) \\ -2(x_2 + x_n)x - 2(y_2 + y_n)y + 2k = d_2^2 + d_n^2 - (E_2 + E_n) \\ \vdots \\ -2(x_{n-1} + x_n)x - 2(y_{n-1} + y_n)y + 2k = d_{n-1}^2 + d_n^2 - (E_{n-1} + E_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k = x^2 + y^2$, $E_i = x_i^2 + y_i^2$, $\forall i = 1, 2, 3, \dots, n$.

其矩阵形式为 $\mathbf{QZ} = \mathbf{H}$, 其中, $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{Z}$ 、 $\mathbf{H}$ 分别为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -2(x_1 + x_n) & -2(y_1 + y_n) & 2 \\ -2(x_2 + x_n) & -2(y_2 + y_n) & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2(x_{n-1} + x_n) & -2(y_{n-1} + y_n) & 2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} d_1^2 + d_n^2 - (E_1 + E_n) \\ d_2^2 + d_n^2 - (E_2 + E_n) \\ \vdots \\ d_{n-1}^2 + d_n^2 - (E_{n-1} + E_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ k \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{Q}^T \mathbf{W} \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{W}$ 是从未知节点到锚节点的最小跳数的加权矩阵.在定位过程中,如果一个锚节点距离未知节点较远,跳数较大,它们之间的距离误差就会随之增大,相应的加权值就应该较小.因此,未知节点到锚节点的加权值可设定为它们之间相距最小跳数的倒数的平方,从而弱化距离未知节点大于一跳的锚节点所起的作用.对于一个未知节点 p ,设计相互的加权矩阵如下:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{p,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{p,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{p,n-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$w_{p,i} = \left(\frac{1}{h_{p,i}} \right)^2 \quad (9)$$

式中, $w_{p,i}$ 是未知节点 p 相对于锚节点 i 的加权系数, $h_{p,i}$ 是未知节点 p 与锚节点 i 之间的最小跳数.

通过解方程组(7),可得到式(6)的结果,即未知节点可以获得它的估计位置 (x, y) 和 k ,如果此时恰好满足 $k = x^2 + y^2$ 即为所求的结果,如图1中A点所示.但由于 d_i 中存在误差,未知节点的估计坐标 (x, y) 一般不满足式(3)中的 $k = x^2 + y^2$,如果 $k < x^2 + y^2$,未知节点的估计位置就是图1中B点;如果 $k > x^2 + y^2$,估计位置就是图1中C点.此时,利用式(6)得到的 (x, y) 和 k ,可以对未知节点的估计位置 (x, y) 进行修正.

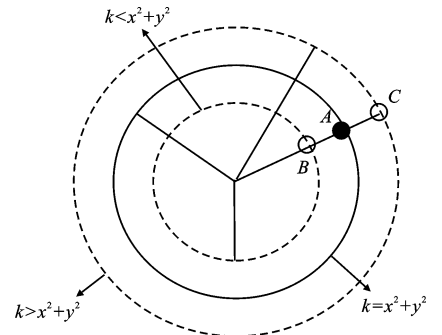


图1 未知节点的估计位置示意图

3.2 未知节点位置信息的修正

由于定义的是 $k = x^2 + y^2$, 从误差的加和性而言, 所求得的 k 的误差理论上大于 x 或 y 的误差, 修正时其权值应该相对较小一些. 为了方便区别, 把表示 k 值的 x 和 y 标记为 x' 和 y' , 未知节点 p 的估计位置坐标为 (x'', y'') . 令

$$\begin{cases} x' = t \times x'' \\ y' = t \times y'' \end{cases} \quad (10)$$

式中, t 是一个参数, 将 t 带入 $k = (x')^2 + (y')^2$ 中, 可以得到 t 值. 然后, 把 t 值带入式(10)中, 解出对应于 k 的 x' 和 y' 值. 然后用式(11)对未知节点 p 的坐标进行修正. 这样可使其更接近真实的位置.

$$\begin{cases} x = \frac{x' + 2x''}{3} \\ y = \frac{y' + 2y''}{3} \end{cases} \quad (11)$$

3.3 DV-Hop 算法和改进 DV-Hop 算法中修正项的比较

在本节中, 对式(1)和式(3)中的修正项进行对比分析. 假定未知节点 p 到锚节点 i 和 n 的实际距离分别为 $\hat{d}_i$ 和 $\hat{d}_n$, 估计距离分别为 d_i 和 d_n , 估计距离的误差分别为 δd_i 和 δd_n . 有:

$$\begin{cases} \hat{d}_i = d_i + \delta d_i \\ \hat{d}_n = d_n + \delta d_n \end{cases} \quad (12)$$

在 DV-Hop 算法的计算中, 是前 $n-1$ 个方程平方后分别减去第 n 个方程的平方. 因此, 在 DV-Hop 算法中, 误差项为

$$(\hat{d}_i)^2 - (\hat{d}_n)^2 = (d_i + \delta d_i)^2 - (d_n + \delta d_n)^2 \quad (13)$$

假设 $\hat{d}_n \gg \delta d_n$, 化简, 可得:

$$\frac{(\hat{d}_i)^2 - (\hat{d}_n)^2}{2(\hat{d}_n)^2} = \frac{d_i^2 - d_n^2}{2(\hat{d}_n)^2} + \frac{(d_i \delta d_i - d_n \delta d_n)}{(\hat{d}_n)^2}$$

因此, 在上式中的修正项就是:

$$\frac{(d_i \delta d_i - d_n \delta d_n)}{(\hat{d}_n)^2} \quad (14)$$

在改进的 DV-Hop 算法中, 是用前 $n-1$ 个方程减去第 n 个方程, 然后平方, 由此可得:

$$(\hat{d}_i - \hat{d}_n)^2 = [(d_i + \delta d_i) - (d_n + \delta d_n)]^2,$$

化简后可得:

$$\begin{aligned} \frac{(\hat{d}_i - \hat{d}_n)^2}{2(\hat{d}_n)^2(d_i - d_n)} &= \frac{(d_i - d_n)^2}{2(\hat{d}_n)^2(d_i - d_n)} + \\ &\frac{(\delta d_i - \delta d_n)}{(\hat{d}_n)^2}. \end{aligned}$$

因此, 上面方程中的修正项就是:

$$\frac{(\delta d_i - \delta d_n)}{(\hat{d}_n)^2} \quad (15)$$

令 $|\delta d_i| \leq L, d_i \leq M, \hat{d}_n \leq M' (L, M, M' \in R)$. 那么, 对于式(14),

$$\frac{(d_i \delta d_i - d_n \delta d_n)}{(\hat{d}_n)^2} \leq \frac{2ML}{(M')^2} \quad (16)$$

同样, 式(15)可得:

$$\frac{(\delta d_i - \delta d_n)}{(\hat{d}_n)^2} \leq \frac{2L}{(M')^2} \quad (17)$$

假设 $M \geq 1$ 那么通过不等式(16)和(17), 可以获得修正项的关系为

$$\frac{2L}{(M')^2} \leq \frac{2ML}{(M')^2} \quad (18)$$

这说明改进的 DV-Hop 算法在距离估计方程中的修正因子较小, 从而获得了较高的定位精度.

4 仿真结果与分析

通过仿真对本文改进的 DV-Hop 算法和文献[6-7]中的改进算法以及原始 DV-Hop 算法进行比较. 仿真过程中, 将每种情形随机运行 100 次, 并取 100 次结果的平均值作为最终结果. 在仿真实验中, 传感器节点随机分布在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的方形区域. 每一个节点都有相同的通信半径. 定位误差的计算方式如式(19)所示:

$$LE = \frac{\sum_{i=M+1}^N \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2}}{R \times (N - M)} \quad (19)$$

式中, (x_i, y_i) 是未知节点 i 的实际坐标, (x'_i, y'_i) 是未知节点的估计坐标, R 是传感器节点的通信半径, N 是在传感区域的全部节点数, M 是锚节点数. 由式(19)中可知, 未知节点数, 锚节点数以及节点的通信半径对定位误差有影响.

4.1 全部节点数对定位误差的影响

如图 2 所示, 锚节点数是节点总数的 10%, 通信半径设置为 30 m, 节点数目由 100 个增加到 400 个. 随着节点数目的增大, 所有算法的定位误差呈减小趋势, 这主要是由于网络连通度的增加, 使得锚节点的平均跳距更加准确. 本文改进算法的定位误差始终低于原始的 DV-Hop 算法和文献[6-7]中的算法. DV-Hop 算法的定位误差减少 6%, 文献[6]中改进算法的定位误差减少 9%, 文献[7]中改进算法的定位误差减少 10%, 本文改进算法的定位误差减少 11%. 此外, 本文中改进算法的最小定位误差可达 20%, 定位精度较高.

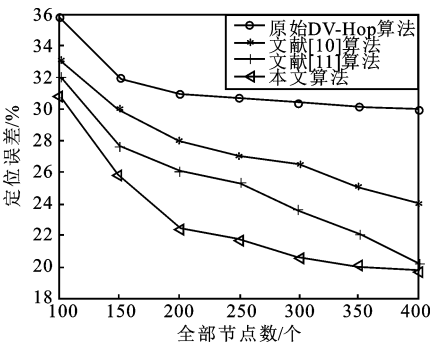


图 2 节点数与定位误差之间的关系

4.2 锚节点比例对定位误差的影响

图 3 中,节点数量设置为 300 个,通信半径是 30 m. 锚节点比例从 5% 增加到 30% 时,所有算法的定位误差都随着锚节点数量的增加而减小,这是因为随着锚节点比例增加,锚节点的平均跳距更加准确,锚节点与未知节点之间的跳数减小,未知节点可以从更多的锚节点处获得信息. 本文改进算法的定位误差减少 9%,当锚节点比例达 30% 时,定位误差仅为 17%;原始 DV-Hop 算法的定位误差减少 5%;文献[6]中改进算法的定位误差减少 6.5%;文献[7]中改进算法的定位误差减少 6.4%. 仿真结果表明,改进算法的定位误差始终低于原始的 DV-Hop 算法和文献[6-7]中的算法.

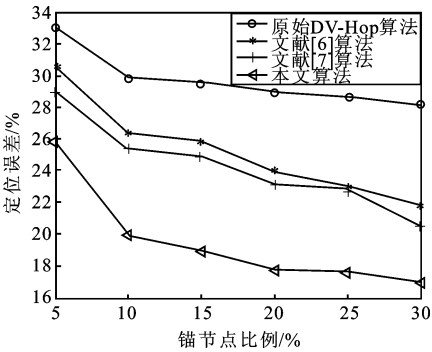


图 3 锚节点比例与定位误差之间的关系

4.3 节点的通信半径对定位误差的影响

在图 4 中,节点数目设置为 300 个,锚节点比例是 10%,通信半径的变化范围是 15~40 m. 随着传感器节点通信半径的增大,原始 DV-Hop 算法和文献[6-7]中的改进算法的定位误差都在减小,而本文改进算法的误差先降后升. 这是因为当通信半径增大时,网络的连通度增加,每个未知节点的邻居锚节点数增加. 因此,原始算法和文献[6-7]中的改进算法的定位误差随着通信半径的增大而减小. 而对于本文中

的改进算法,当通信半径增大至某一固定值时,精度变化趋势与原始 DV-Hop 算法相同,但是当通信半径继续增大时,会导致在锚节点的通信范围内存在更多的未知节点,而这些未知节点以这一锚节点的平均跳距计算与其他锚节点之间的距离,会增大距离的估计误差. 随着通信半径的增大,误差会越明显. 所以改进算法的定位误差会出现不降反增的现象,且在通信半径等于 20 m 时有最佳的定位精度. 但是改进算法的定位误差始终低于原始的 DV-Hop 算法和文献[6-7]中的改进算法,且当通信半径为 15 m 时,可以提高最高约 18% 的精度. 因此,本文的改进算法在通信半径较小时,优势更为明显. 故而本文的改进算法可以更好地应用于实际场景.

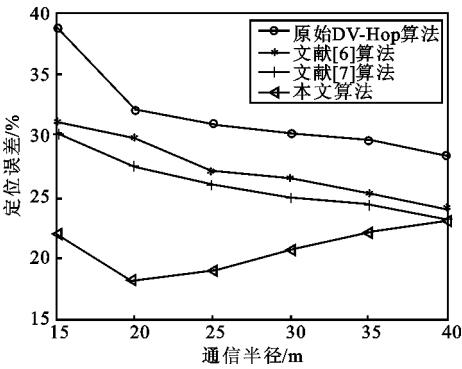


图 4 通信半径与定位误差之间的关系

5 结束语

在无线传感器网络中,定位算法需要具备成本低和精度高的优势. 本文为了减小多跳产生的定位误差,将跳数作为加权值,设计相应的加权矩阵,并采用加权最小平方解方程组,最后利用求解方程组时得到的冗余信息对未知节点的位置进行进一步的修正. 理论分析和仿真实验结果表明,该改进算法在不增加额外硬件和通信成本的基础上,通过少量的计算有效地降低了定位误差. 可提高定位精度 10%~20%,且对于通信半径较小的应用场合有较大的优势.

参考文献:

[1] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA[C]// INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. USA, San Francisco, IEEE Societies, 2003: 1734- 1743.

参考文献:

- [1] Farhadi A, Endres I, Hoiem D, et al. Describing objects by their attributes [C] // Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on. USA, Miami, IEEE, 2009: 1778-1785.
- [2] Bourdev L, Maji S, Brox T, et al. Detecting people using mutually consistent poselet activations [M] // Computer Vision - ECCV 2010. Berlin, Heidelberg Springer, 2010: 168-181.
- [3] Liu S, Feng J, Song Z, et al. Hi, magic closet, tell me what to wear! [C] // Proceedings of the 20th ACM international conference on Multimedia. USA, Dallas, ACM, 2012: 619-628.
- [4] Yang Y, Ramanan D. Articulated pose estimation with flexible mixtures-of-parts [C] // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on. USA, Colorado Springs, IEEE, 2011: 1385-1392.
- [5] Jones M J, Rehg J M. Statistical color models with application to skin detection [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 46(1): 81-96.
- [6] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 32-42.
- [7] 徐勋华, 王继成. 支撑向量机的多类分类方法 [J]. 微电子学与计算机, 2005, 21(10): 149-152.
- [8] Madzarov G, Gjorgjevikj D, Chorbev I. A Multi-class SVM Classifier Utilizing Binary Decision Tree [J]. Informatica (Slovenia), 2009, 33(2): 225-233.

作者简介:

刘 聪 女, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为计算机视觉、模式识别. E-mail: cong-liu11@mails. tsinghua. edu. cn.
丁贵广 男, (1976-), 副教授, 博士生导师. 研究方向为计算机视觉、模式识别、信息检索.

(上接第 27 页)

- [2] Niculescu D, Nath B. Ad Hoc positioning system (APS) [C] // Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. San Antonio, IEEE, 2001: 2926-2931.
- [3] Brito L A, Liu Yi, Garcia Y. An improved error localization on DV-Hop scheme for wireless sensors networks [C] // Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010 3rd International Conference on. Chengdu, 2010: 20-22.
- [4] Zhang Dengyi, Liu Feng, Wang Lei, et al. DV-Hop localization Algorithms based on centroid in wireless sensor networks [C] // Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012 2nd International Conference on. China, Yichang, 2012: 3216-3219.
- [5] Li Mudong, Xiong Wei, Liang Qing. An improved ABC-based node localization algorithm for wireless sensor network [C] // Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2012 8th International Conference. Shanghai, 2012: 1-4.
- [6] 邱奉美, 李怀忠. 无线传感器网络 DV-Hop 定位算法的改进 [J]. 计算机工程, 2014, 40(8): 16-20.
- [7] 吴楠, 刘方爱, 王淑娟. 基于跳数修正和跳距调整的 DV-Hop 定位改进算法 [J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(1): 91-95.

作者简介:

李长庚 男, (1970-), 博士, 教授. 研究为无线传感器网络.
刘孟思 (通讯作者) 女, (1990-), 硕士研究生. 研究为无线传感器网络定位. E-mail: 761242689@qq. com.