

基于跳距修正粒子群优化的 WSN 定位算法

赵雁航, 钱志鸿, 尚小航, 程超
(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对 DV-Hop 算法在节点随机分布的网络拓扑环境中存在较大误差的问题, 提出了一种基于跳距修正粒子群优化的定位算法 WPDV-Hop(weight PSO DV-Hop)。本算法通过对锚节点广播的数据分组结构进行了改进, 对参考锚节点的平均每跳距离的误差进行加权处理以及用改进的粒子群(PSO)算法对定位中的迭代过程进行优化, 实现 WPDV-Hop 定位算法的全面改进, 以提高定位精度。仿真结果表明, 改进的算法与原始算法相比, 定位精度和算法的稳定性有明显提高。

关键词: WSN; 定位; 误差加权; 平均跳距; 粒子群
中图分类号: TN92 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-436X(2013)09-0105-10

PSO localization algorithm for WSN nodes based on modifying average hop distances

ZHAO Yan-hang, QIAN Zhi-hong, SHANG Xiao-hang, CHENG Chao
(School of Communication Engineering, University of Jilin, Changchun 130012, China)

Abstract: Regarding the relatively big errors with running the DV-hop localization algorithm in a network topology scenario, with which nodes randomly distributes, a particle swarm optimization localization algorithm for WSN nodes based on modifying average hop distance was proposed. changing the structure of data packets sent by anchor nodes with broadcasting, weighting the average hop distance error of reference anchor nodes to modify the average hop distance, and using an improved particle swarm algorithm to optimize iteration process for localization, thus, WPDV-Hop localization algorithm improvements were carried out. The simulation results indicate that the localization accuracy and the stability of the WPDV-Hop localization algorithm are significantly improved compared with the original algorithm.

Key words: wireless sensor network; localization; error-weighted; average hop distance; particle swarm algorithm

1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)是由大量的静止或者移动的传感器节点以自组织和多跳的方式构成的无线网络^[1]。WSN 感知、采集、处理和传输网络覆盖地理区域内被感知对象的信息, 并且最终把这些信息发送给网络。随着无线传感器网络的飞速发展和日益成熟, 对无线传感器网络的研究也越来越多, 经过研究总结, 对无线传感器网络中传感器节点的定位是研究无线传感器网络的基础, 是必不可少的部分。无论是对无线传感器的哪个方向进行研

究, 被监测对象的位置信息和组成无线传感器网络的传感器节点的位置信息都是需要重点研究探讨的, 如果节点位置不明确, 剩下的其他工作将显得毫无意义。因此, 无线传感器网络的未知节点定位问题已然成为无线传感器网络的研究热点。定位的方法有很多种, 到目前为止研究最热门的有基于距离(range-based)和距离无关(range-free)的两种定位算法。基于距离的定位算法对未知节点的定位利用的节点之间的信号强度或者角度信息, 这种类型的定位算法需要有外在的硬件设备支持, 典型的基于距离的定位算法主要有基于到达角度 AOA^[2]的定位算法、基于到

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071073); 教育部高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20090061110043)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of china(61071073); The Doctoral Foundation of Ministry of Education of China (20090061110043)

达时间 TOA^[3]的定位算法、基于到达时间差 TDOA^[4]的定位算法以及基于信号接收强度指示 RSSI^[5]的定位算法。而距离无关的定位算法对未知节点的定位是利用已知锚节点的信息和网络连通度来估计的,相较于基于测距的定位算法来说,无需测距的定位算法并不需要硬件设备的支持,成本低,并且算法实现简单,因而距离无关的定位算法越来越受到大家的关注,目前研究最多的包括 Amorphous 算法^[6,7]、质心算法^[8]和本文将要进行讨论的 DV-Hop 算法^[9,10]等。

其中无需测距的定位算法中的典型代表就是 DV-Hop 算法,它的算法实现简单并且对网络节点也没有额外的要求,具有成本低、开销小等优点,也是目前应用最为广泛的定位算法之一。但是 DV-Hop 算法的主要缺点是定位不够准确,受网络拓扑结构的影响很大,使得定位误差较大,因此文献[8~12]分别对 DV-Hop 算法进行了一定程度的改进。文献[13]中对计算锚节点的平均每跳距离值做了改进,并且将所有锚节点的平均每跳距离值取平均值,一定程度上减小了定位误差;文献[14]的改进在于对未知节点的定位过程中将未知节点作为虚拟的锚节点,这种改进算法的优点在于锚节点的密度对定位过程的影响较小,但是其缺点在于将未知节点作为锚节点会引起误差的累积;文献[15]同样对计算平均每跳距离值的方法做了改进,并且对未知节点的定位结果进行了优化,其中计算锚节点的平均每跳距离值采用的是最小均方误差,而结果的优化采用的是对信赖域序列进行二次规划;文献[16]是对评价定位的体系做了改进工作,建立了一种对误差进行分析的模型。本文将针对节点随机分布的网络拓扑环境,对 DV-Hop 算法进行适当且合理的改进,并通过仿真对改进方案的性能进行比较和验证。

2 算法描述

2.1 DV-Hop 定位算法

DV-Hop 定位算法^[2,9]的过程如下。

step1 锚节点广播数据分组。在该步骤里所有的节点都可以获得锚节点的相关信息。具体来讲就是所有的锚节点用泛洪的方式给它的邻居节点发送一个数据分组,其结构如图 1 所示。

锚节点标识 i	锚节点坐标 (x_i, y_i)	跳数 h_{ij} (初始化为 1)
-----------	--------------------	-------------------------

图 1 DV-Hop 算法中锚节点广播数据分组的结构

step2 计算并且广播校正。当节点接收到锚节点发送过来的跳数和坐标信息之后,利用式(1)计算出每个锚节点的平均每跳的距离值。

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

其中, $HopSize_i$ 表示锚节点 i 的平均每跳的距离, h_{ij} 表示锚节点 i 和锚节点 j 之间的最小跳数 ($i \neq j$), (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 表示锚节点 i 和锚节点 j 的坐标。

然后第二次以泛洪方式广播根据式(1)计算出来的单个锚节点的平均每跳距离值,为了保证节点所接收到的校正值得来自于距离它最近的锚节点,所以接收信息的节点只选择接收其第一个收到的校正值得,后面所接收的校正值得均做丢弃处理。

step3 定位计算阶段。未知节点根据 step1 接收到的最小跳数以及 step2 计算出的平均每跳距离的校正值得,得到其与各个锚节点之间的估计距离,再根据三边测量法或者极大似然估计法计算出未知节点的定位坐标。

2.2 算法举例

已知图 2 中 A、B、C 代表已知坐标信息的锚节点,并且已知 A 和 B 之间实际距离为 D_1 , B 和 C 之间实际距离为 D_2 , A 和 C 之间实际距离为 D_3 。根据 DV-Hop 定位算法的前 2 个阶段,就可以获得节点之间的跳数信息以及单个锚节点的平均每跳距离的估计值。A 和 B 距离 2 跳, B 和 C 距离 5 跳, A 和 C 距离 6 跳,根据式(2)~式(4)分别求出 A、B、C 3 个锚节点的平均每跳距离值 $HopSize_A$ 、 $HopSize_B$ 、 $HopSize_C$ 。由图 1 可知,未知节点 M 和锚节点 A 之间的距离为 3 跳,和锚节点 B 之间距离为 2 跳,和锚节点 C 之间距离为 3 跳,由于锚节点 B 距离未知节点 M 最近,因此未知节点 M 的平均每跳距离估计值会选择锚节点 B 的平均每跳距离。

$$HopSize_A = \frac{D_1 + D_3}{2 + 6} \quad (2)$$

$$HopSize_B = \frac{D_1 + D_2}{2 + 5} \quad (3)$$

$$HopSize_C = \frac{D_2 + D_3}{5 + 6} \quad (4)$$

因此可以得出未知节点 M 与锚节点 A 、 B 、 C 的距离分别为 $3HopSize_B$ 、 $2HopSize_B$ 、 $3HopSize_B$ 。因此目标节点 M 的位置坐标就可以通过三边测量法或者是极大似然估计法计算得出。

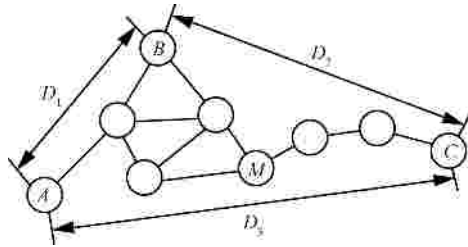


图2 DV-Hop 定位算法示意

2.3 定位误差的分析

DV-Hop 定位算法对节点的定位是完全依靠网络连通度进行的，DV-Hop 定位时在估算定位方面，其算法本身就会对定位的准确度有一定的影响，降低定位精度。通过分析可以得出，误差的产生主要有以下几个方面原因^[17]。

1) 跳数信息

无线传感器网络在定位时节点间实际距离的计算是用跳数信息来代替的。而无线传感器网络中的节点数目大且分布随机，因此未知节点和锚节点之间并不一定是直线距离，因而节点之间跳数越多，对距离进行估计产生的误差就会越大，定位精度就会越低。

2) 平均每跳距离的估计值

无线传感器网络的定位其实际距离采用的是平均每跳距离的估计值和跳数信息的乘积，因此定位精度在很大程度上会受到平均每跳距离估计值的影响。因此未知节点的定位精度甚至整个网络的定位精度都会受到平均每跳距离估计值的影响。

3) 定位的计算方法

在得到锚节点的平均每跳距离的估计值后，要想得到未知节点的坐标一般情况下使用的都是三边测量法或者是极大似然估计法。其中三边测量法的优点是计算复杂度有所降低，缺点是测距误差的影响较大，因此如果 3 个作为参考节点的锚节点呈分散分布，并且这 3 个锚节点的平均每跳距离值的计算时误差较大，那么测距误差就会较大程度地影响定位结果。因此使用三边测量法得到的结果就会有较大的误差，影响了网络的定位精度。而如果使用极大似然估计法来计算，

则由 $AX=b$ 已知矩阵 A ， b 都会对所求矩阵 X （即未知节点的坐标）有重要影响。因此使用极大似然估计法产生误差降低精度的原因主要包括 2 个方面，一个是可以最小二乘法加以改进的矩阵 b 带来的误差，另外一个是由硬件本身带来的矩阵 A 的误差。

3 WPDV-Hop 算法

在无线传感器网络中，如果节点是随机分布的，那么要降低定位误差^[18~20]就需要对算法本身进行改进。为了减小定位误差，提高定位精度，完善定位结果，本文主要在 3 个方面对 DV-Hop 算法做了根本改变，其中包括对锚节点发送的数据分组结构做了改变，增加了参数最大传播跳数、对求解锚节点的平均每跳距离值时产生的误差进行加权处理以及改进粒子群（PSO）算法以优化定位结果。

3.1 限制广播数据分组的范围

使用 DV-Hop 算法进行未知节点的定位时，在距离矢量交换的阶段，所有的锚节点都会向其邻居节点发送包含锚节点标识、锚节点坐标和跳数信息的广播数据分组。由于无线传感器网络中节点数量大且均呈随机分布，因而数据分组在广播过程中会不可避免地出现冲突或碰撞的情况。当发生冲突或碰撞时，如果数据分组的信息丢失，则节点之间的最小跳数会出现偏差，从而影响了定位过程的正常进行，而如果重新发送数据分组，由于无线传感器网络节点数量多且分布分散的特点，则大大增加了网络负担。由于 DV-Hop 算法中实际距离的计算采用的是跳数信息，而无线传感器网络节点随机分布的特点导致未知节点和锚节点之间并不是统一的直线距离，因而未知节点和锚节点之间跳数越多，误差越大。因此限制数据分组的广播范围和最大传播跳数显得尤为重要，可以设定在允许范围内地最大的传播跳数 $Max Hop(H_M)$ 来最大化地避免以泛洪方式发送数据分组时发生的冲突或者碰撞，从而降低数据分组在传输过程中发生冲突或碰撞的概率。其中 H_M 的取值是人为规定，可以根据网络规模、锚节点在网络中所占的比例以及网络连通度的不同而选择不同的标准，因而当网络中锚节点数目较少或锚节点所占比例较小的时候，可以人为地调整 H_M 的选择标准，使得在距离未知节点 H_M 跳数范围

内有锚节点的存在。增加了最大传播跳数作为参数的数据分组格式，如图 3 所示。

锚节点标识 i	锚节点坐标 (x_i, y_i)	跳数 h_i (初始化为 1)	生存周期 H_M
-----------	--------------------	----------------------	------------

图 3 WPDV-Hop 算法的数据分组结构

泛洪数据分组增加了最大传播跳数这个参数之后，未知节点收到锚节点信息的范围被限制在 H_M 范围内，因而减小了数据分组传递过程中可能出现失误的范围，从而减小了冲突或碰撞的概率，不但降低了网络开销也减小了定位误差，从而使得定位更加准确。

3.2 基于估计锚节点平均跳距产生误差的加权算法

在 DV-Hop 算法的计算及广播校正值的阶段会第二次以泛洪的方式广播通过计算得到的锚节点的平均每跳距离的估计值，而未知节点的平均每跳距离采用的是距离它跳数最小锚节点的估计值。由于无线传感器网络中节点是随机分布的，因此每一个锚节点的校正误差大小不同，而如果未知节点的平均每跳距离值只是单纯地采用距离它跳数最小锚节点的平均跳距估计值，这样就会产生较大的误差，而且就节点数量很大的无线传感器网络而言，一个参考节点并不能反映整个网络的属性。当未知节点选择的参考锚节点的平均每跳距离估计值误差很大时，就会产生很大的定位误差。因此传统的算法虽然实现简单，但是其选择单个锚节点的平均每跳距离的估计值作为未知节点的平均每跳距离值的方法并不能准确地反映网络中节点的真实情况，不能准确地对网络节点进行定位。因此想要解决单一参考节点不能全面反映整个网络的问题，就必须选择多个参考节点进行综合考虑，从而使得对未知节点平均每跳距离的估计更加准确，对未知节点的定位也更加准确。

具体的改进算法如下：对未知节点接收的多个距离它最近锚节点的平均跳距做归一化加权处理^[19]，把较大的权值赋给误差较小的锚节点的估计值。基于对多个锚节点信息的综合考虑，且通过归一化处理加强了平均跳距误差小的锚节点的影响，减小了误差较大锚节点的影响，以此方法得到的未知节点的平均每跳距离误差较小，因而一定程度上提高了定位精度。

在无线传感器网络中用 (x_i, y_i) 表示已知锚节点 i 的坐标信息，则锚节点的平均每跳距离 C_i 为

$$C_i = \frac{\sum_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{i \neq j} h_{ij}} \quad (5)$$

其中， j 表示给锚节点 i 发送位置信息的锚节点， h_{ij} 表示锚节点 i 和 j 之间的跳数。由于 2 个锚节点坐标信息已知，则 i 和 j 之间的实际距离 d_{rij} 为

$$d_{rij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (6)$$

锚节点 i 和 j 之间测量距离 d_{eij} 为

$$d_{eij} = C_i \times h_{ij} \quad (7)$$

假设网络中锚节点数目为 M ，则锚节点 i 的平均每跳距离的误差 e_i 为

$$e_i = \frac{\sum_{i \neq j} |d_{rij} - d_{eij}| / h_{ij}}{M - 1} \quad (8)$$

由于未知节点接受了多个锚节点的信息，而不同的锚节点误差不同所反映的未知节点信息也不同。其中 e_i 越小的锚节点对未知节点的平均每跳距离值估计就越准确，所以要想更好地反映未知节点的情况，就需要将较大的权值赋给 e_i 较小的锚节点，这样才能更加准确地定位未知节点，提高定位精度。

假设未知节点总共接收到 n 个锚节点发送的数据分组，则将第 i 个锚节点的平均每跳距离的加权值 l_i 定义为对其自身的平均每跳距离误差的倒数与所有锚节点的平均每跳距离的误差倒数之和取商，表示为

$$l_i = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{e_k}} \quad (9)$$

当利用式 (9) 得到锚节点所对应的加权值之后，较大的权值赋给了误差较小的锚节点，不同误差的锚节点也不同程度的反映了未知节点，因而可以得到未知节点的平均每跳距离的估计值。

由于与未知节点之间距离较远的锚节点的平均每跳距离值和其估计值相差较大，会使得误差增大，因此并不是接收越多的锚节点的平均每跳距离值就能越好地反映未知节点信息，所以在 WPDV-Hop 算法中，设定只接收最近的 3 个锚节点的信息。因此在改进算法中根据算法设定所接收的 3 个锚节点 k, s, t 所估计的平均每跳距离值对未知节点的平均每跳距离估计值进行加权计

算，结果如下

$$C = l_k \times C_k + l_s \times C_s + l_t \times C_t \quad (10)$$

从式(10)可以看出，未知节点的平均每跳距离的估计值与其参考锚节点的平均每跳距离 C_i 以及该锚节点的加权值 ρ_i 有关，3 个参考锚节点的 C_i 和 ρ_i 分别相乘之后取和即为未知节点的平均每跳距离估计值，并且对 ρ_i 做归一化处理，使得锚节点的权值之和为 1。

通过对算法的改进，即对作为参考节点的 3 个锚节点按照其平均每跳距离的误差不同而赋予不同的权值，因而能够更加准确地估计未知节点的平均每跳距离值，从而更加全面并且真实地反映网络的真实情况，这种改进的算法一定程度上减小了定位误差，解决了无线传感器网络无需距离的定位算法定位误差较大的问题。

3.3 采用改进的粒子群(PSO)算法对定位结果进行优化

在节点定位时用改进的粒子群 (PSO) 算法来优化定位结果，粒子群算法不仅对测量误差的敏感度非常低，并且能够快速找到最优解，从而提高定位精度，解决了由于误差过高而引起的定位精度下降问题。

1995 年，R.Eberthart 博士和 J.Kennedy 博士经过大量研究提出了粒子群优化(PSO, particle swarm optimization) 算法^[21]。该算法采用的模型是“位置+速度”，其算法原理为：在一个解空间里有很多个“粒子”，这些“粒子”的速度和位置是靠其“个体最优值”和“全局最优值”来不断更新的，而其速度和位置的更新则可以使“粒子”不断地移动到最优点处。

每个粒子通过 2 个极值来更新其位置和速度，其中一个是个体最优值 $pBest$ ，即在当前情况下粒子自身的最优值；另外一个全局最优值 $gBest$ ，即截至到目前该粒子群在历史上的最优值。当粒子找到了这 2 个极值，则根据式 (11) 和式 (12) 来改变其自身的“位置+速度”模型。

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c_1 \times r_1 (pBest_i - x_i(t)) + c_2 \times r_2 (gBest - x_i(t)) \quad (11)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (12)$$

其中， i 表示该粒子群中的第 i 个粒子， t 表示总的迭代次数， c_1 、 c_2 表示的是学习因子，用 c_1 、 c_2 来引导粒子群里的粒子逐渐靠近其个体最优值和全局最优值， r_1 、 r_2 用来表示在区间 (0,1) 上呈均匀

分布的随机数。由式 (11) 和式 (12) 可以看出，粒子在更新前的速度 v_i 、个体最优值 $pBest$ 和全局最优值 $gBest$ 都能对粒子的位置更新产生影响。在这 3 个影响因素里粒子更新前的速度 v_i 体现的是全局搜索能力， v_i 的增大可以增大粒子的搜索空间，从而开辟出新的搜索区域，而个体最优值 $pBest$ 和全局最优值 $gBest$ 主要体现的是局部搜索的能力，使得该粒子群的所有粒子都通过追踪这 2 个极值而趋近同一个位置，从而能更好地在局部区域搜索到最优位置。因此，学者 Y.Shi 和 R.Ebethart 认为引入惯性权重 w 就可以达到平衡全局搜索能力和局部搜索能力的效果，并且惯性权重 w 的数值应该通过粒子搜索过程的演进进行动态调整而不应该是固定的

$$w = w_{max} - t \times \frac{w_{max} - w_{min}}{t_{max}} \quad (13)$$

其中， w_{min} 代表最小的惯性权重， w_{max} 代表最大的惯性权重， t 为当前迭代次数，而 t_{max} 则是最大的迭代次数。从 Y.Shi 和 R.Ebethart 的实验结果中可以得到结果，当 $w_{min}=0.4$ ， $w_{max}=0.95$ 时，算法会得到较为满意的结果^[22]。

用粒子群算法优化定位节点的过程如图 4 所示，图示粒子群里共有 n 个粒子，假设最优位置为 P 点，该粒子群中的 n 个粒子均按照式(11)和式(12)所描述的“位置+速度”模型来更新自身的位置和速度，每个粒子都不断地搜索迭代，因此所有粒子都向最优值 P 处不断地靠近。用第 i 个粒子作为粒子描述单个粒子搜索最优位置的过程，该粒子受到 3 个影响因素的共同影响，包括粒子更新前的速度 v_i 、个体最优值 $pBest$ 和全局最优值 $gBest$ ，因此粒子从最初的位置到达更新之后的位置。然后继续进行下一次的迭代过程，用同样的方式更新其个体最优值 $pBest$ 和全局最优值 $gBest$ ，然后从更新之后的位置出发，不断地向最优点移动。

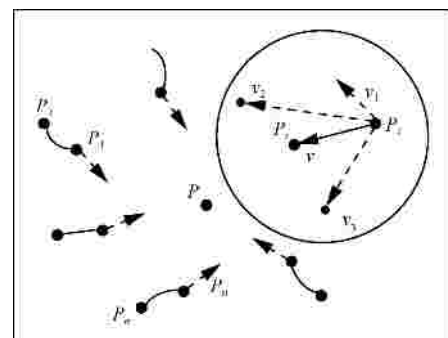


图 4 对 PSO 算法改进后的过程和独立粒子寻找最优位置

使用传统的粒子群算法对定位结果进行优化时，粒子通过不断的参与迭代过程，从而逐渐地靠近最优位置。但是每一次迭代过程都会有一部分粒子能选择最优的路径靠近最优值，也有另外一部分粒子不能选择最优路径，因而这样的粒子会离最优值比较远。用这样的方法进行优化不但效率低，而且不断的迭代大大增加了计算量和网络开销。因而本文对传统的粒子群算法做了改进，步骤如下。

step1 在每次迭代过程之后，比较粒子群里所有粒子的个体最优值 $pBest$ 。

step2 进行完 step1 之后，释放解空间里距离最优解最远的粒子，因此在每次迭代完成之后都会减少一个效率最低的粒子。

通过三边测量法获得未知节点的估计坐标用 (x, y) 表示，用 $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ 分别表示 n 个已知的锚节点位置坐标，用 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 表示未知节点分别到 n 个锚节点的距离，则使用改进的粒子群算法优化定位结果的过程如下。

step1 初始化粒子群。

step2 根据距离公式得到未知节点到 n 个锚节点的距离，构成的非线性方程组如式 (14) 所示。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_1 \\ \vdots \\ \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2} = d_n \end{cases} \quad (14)$$

令 $f_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$ ，其中 i 表示第 i 个锚节点，则粒子的目标函数 F 即适用值函数为

$$F = \sum_i (f_i - d_i)^2 \quad (15)$$

其中， d_i 是经过测量得到的未知节点和锚节点之间的距离，而目标函数 F 的极小值点则为要求的定位坐标。 x, y 的值取用粒子群初始化时的全局最优解 $gBest$ 。

step3 将所有粒子的当前适用值和个体最优值 $pBest$ 进行比较，如果优于个体最优值，则将当前的适用值作为个体最优值，反之则个体最优值不变。

$$pBest^{t+1} = \begin{cases} X^{t+1}, & \text{if } F(X^{t+1}) < F(pBest^t) \\ pBest^t, & \text{if } F(X^{t+1}) > F(pBest^t) \end{cases} \quad (16)$$

step4 将所有粒子的当前适用值和全局最优值 $gBest$ 进行比较，如果优于全局最优值，则将当前的

适用值作为全局最优值，反之则全局最优值不变。

$$gBest^{t+1} = \begin{cases} pBest^{t+1}, & \text{if } F(pBest^{t+1}) < F(gBest^t) \\ gBest^t, & \text{if } F(pBest^{t+1}) > F(gBest^t) \end{cases} \quad (17)$$

step5 粒子按照位置和速度的更新方程不断地更新其位置和速度。

step6 当搜索到的适用值足够好或者已经达到了最大的迭代次数时，终止迭代。否则重新比较所有粒子的个体最优值 $pBest$ ，释放粒子群中和最优解之间距离最大的粒子，然后继续进行 step2。

基于粒子群 PSO 优化算法的改进算法流程图 5 所示。

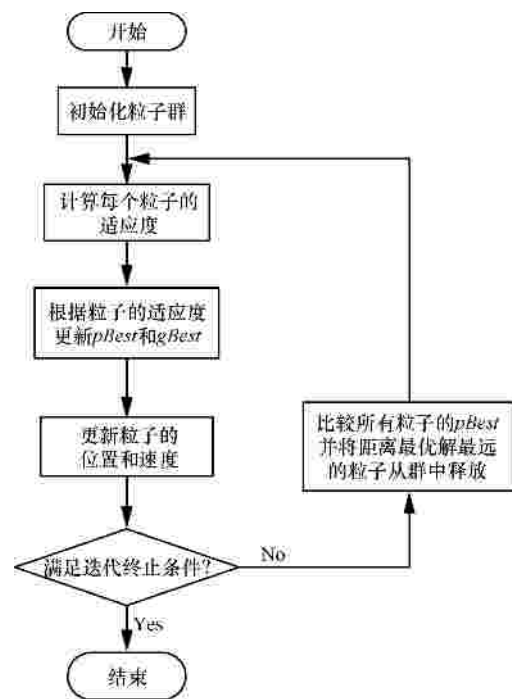


图 5 改进的粒子群优化算法流程

使用改进的粒子群优化算法对定位结果进行优化，为了保证算法收敛避免没有必要的迭代过程需要做一些必要的工作，比如人为的定义适用值，每一次迭代过程之后都会减少参与迭代过程的粒子，人为地设定迭代的终止条件等。改进的粒子群优化算法相较于传统的粒子群算法不仅能够更加快速且准确地找到最优位置而且降低了计算量和网络开销，一定程度上提高了定位精度。

3.4 WPDV-Hop 定位算法的过程

为了解决 DV-Hop 算法定位误差较大的问题，本文提出了基于 DV-Hop 定位算法改进的 WPDV-Hop 算法，其流程如图 6 所示。

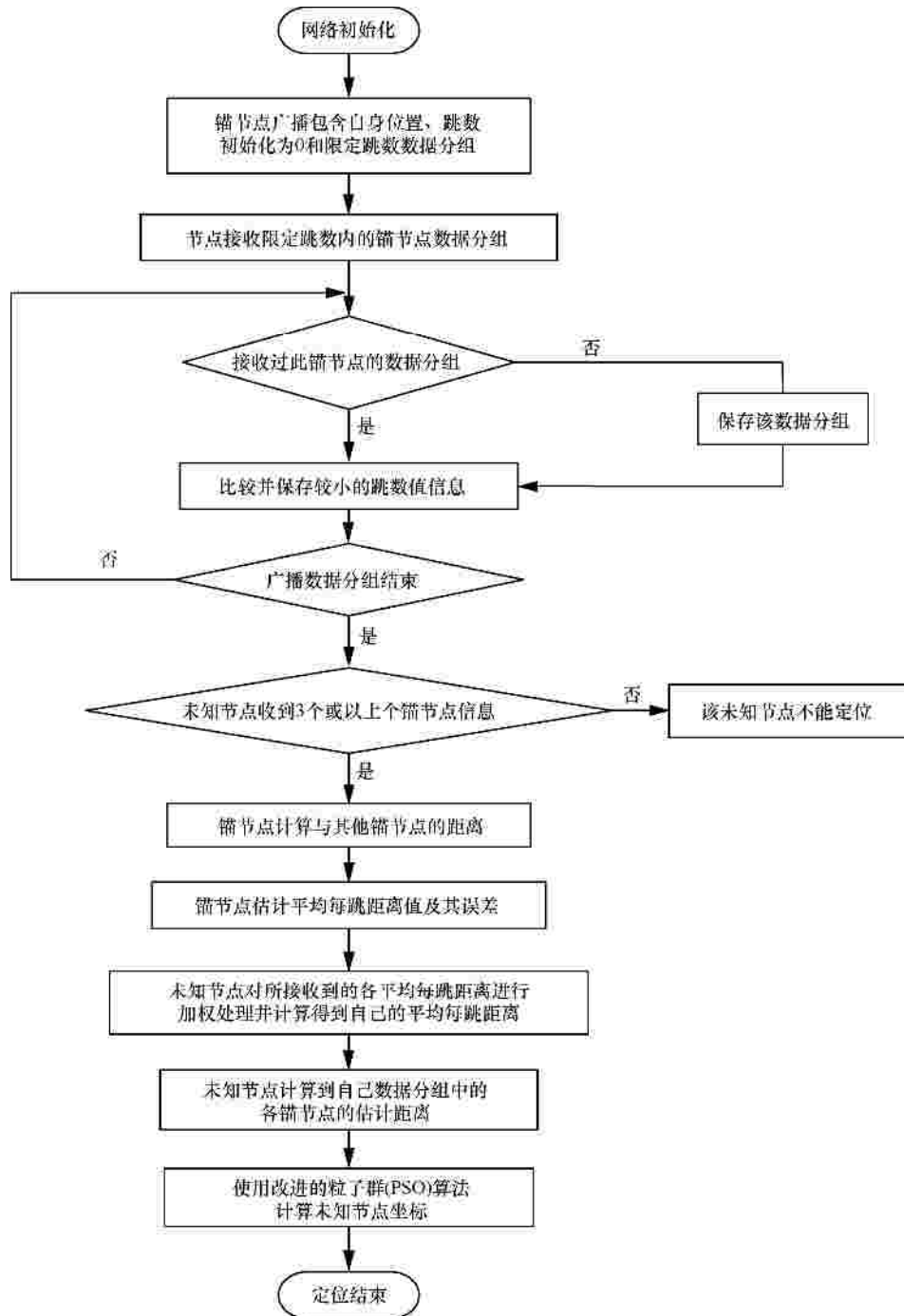


图 6 WPDV-Hop 算法流程

4 仿真分析

4.1 仿真环境

为了验证本文所提算法较原有的 DV-Hop 算法有所改善，性能和定位精度有所提高，就必须对 DV-Hop 算法和 WPDV-Hop 算法进行对比仿真。在实现仿真时，网络的拓扑结构设置如下：网络区域中所有的节点都是随机生成的。每次仿真的网络环

境都是相同的，参数设置如表 1 所示，其中包括网络区域、节点总数、锚节点数目、通信半径等。

在仿真时，选取平均定位误差和对半径的归一化的平均定位误差为仿真参数，用这 2 个参数对改进后的算法 WPDV-Hop 的稳定性和精度进行衡量。假设未知节点 i 的真实坐标值为 (x_i, y_i) ，将其估计坐标值用 (x'_i, y'_i) 来表示，定位节点数用 m 表示，通信半径用 R 表示。

表 1 仿真参数

参数	值
网络区	100 m×100 m
节点总数	100
锚节点数目	5、10、15、20、25、30、35、40
通信半径 R	15 m、20 m、25 m、30 m
仿真次数总计	300 次
生存周期 H_M	5
$c_1=c_2$	2
W_{max}	0.95
W_{min}	0.4
粒子群数目 N	20
最大迭代次数	20 次

则平均定位误差 ave_error 为

$$ave_error = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2}}{m} \quad (18)$$

归一化的平均定位误差 nor_ave_error (对半径进行归一化) 为

$$nor_ave_error = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2}}{R \times m} \times 100\% \quad (19)$$

4.2 仿真分析

无线传感器网络的节点分布图如图 7 所示, 在 100 m×100 m 的网络中圆圈表示的是未知节点, 星星表示的是已知的锚节点, 未知节点和锚节点均呈随机分布。

本文所提 WPDV-Hop 算法的定位误差随着网络中锚节点数目的增加而减小。仿真结果图表示的是纵坐标 (平均定位误差或者是归一化的平均定位误差) 随着横坐标 (锚节点的数量或者是锚节点在总的节点数目中所占的比例) 的变化。本文针对不同的仿真条件, 即不同锚节点数目、不同通信半径的情况分别做了仿真实验, 从所得结果可以看出: 在网络环境相同的情况下, 随着锚节点数目的增加、节点总数的增加以及通信半径的增大, WPDV-Hop 算法在一定程度上减小了定位误差提高了定位精度。

1) 不同的锚节点数目

在 100 m×100 m 范围的网路中取总的节点数目为 100 个, 设定通信半径为 25 m, 分别采用 DV-Hop 算法和 WPDV-Hop 算法在锚节点数目取 5、10、15、20、25、30、35、40 情况下得到的仿真性能比较如图 8 所示。由图 8 可知, 当节点总数取定时, DV-Hop

算法和 WPDV-Hop 算法的平均定位误差都是随着锚节点数目的增加而逐渐降低的, 但明显可以看出, 当锚节点的数量也相同时, WPDV-Hop 算法的平均定位误差是明显低于 DV-Hop 算法的。当网络中的锚节点数量多于 15 个之后, WPDV-Hop 算法的平均定位误差减小得更加明显, 当锚节点的数量为 30 时, WPDV-Hop 算法的平均定位误差比 DV-Hop 算法的小了近 3.2 m, 而当锚节点为 40 时, WPDV-Hop 算法的平均定位误差比 DV-Hop 算法的小了近 2.8 m。因此, 可以明显看出, WPDV-Hop 算法相较于 DV-Hop 算法降低了定位误差, 提高了定位精度。

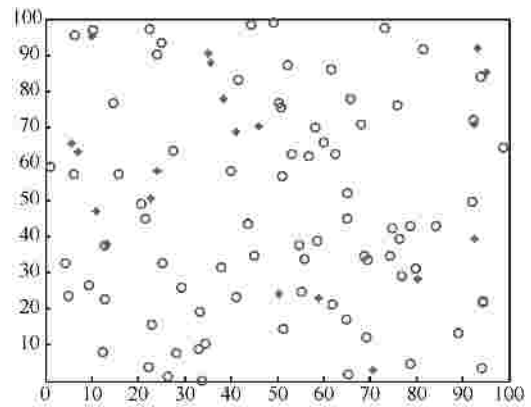


图 7 网络节点分布图

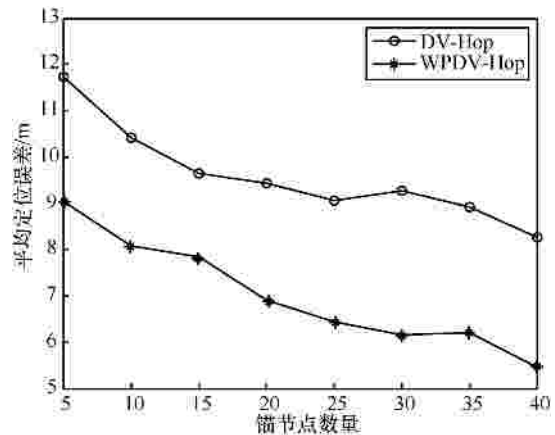
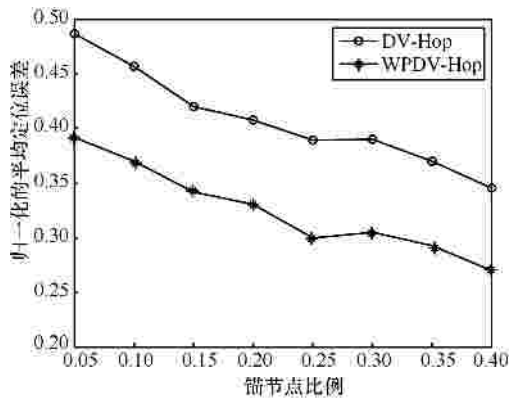


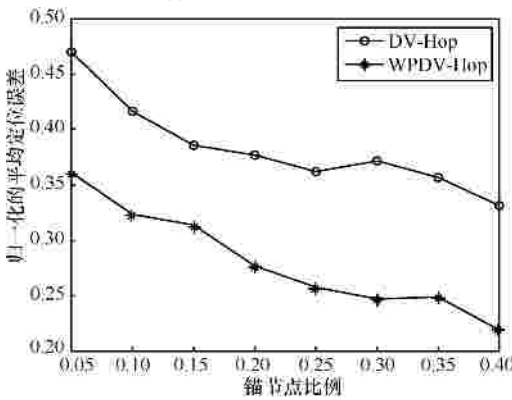
图 8 不同锚节点数目的定位误差对比

2) 不同通信半径

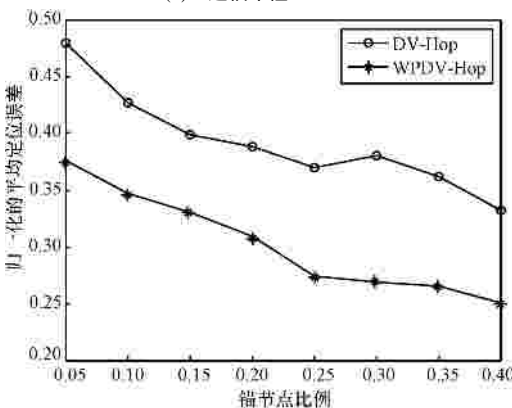
采用 WPDV-Hop 算法和 DV-Hop 算法在通信半径分别取 15、20、25、30 的情况下对半径归一化的平均定位误差的结果如图 9 所示, 其中横轴表示的是网络中锚节点所占节点总数的比例。由图 9 可以看出, WPDV-Hop 和 DV-Hop 2 种算法对半径的归一化的平均定位误差都是随着锚节点所占比例的增大而



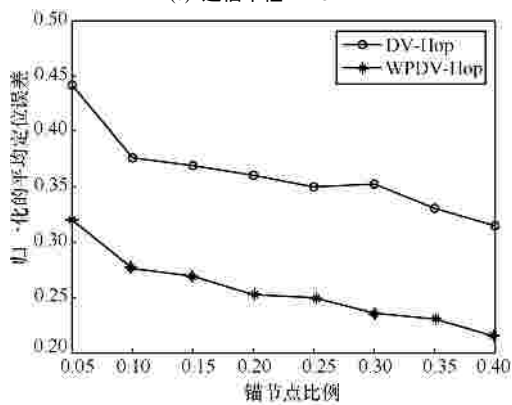
(a) 通信半径 R=15 m



(b) 通信半径 R=20 m



(c) 通信半径 R=25 m



(d) 通信半径 R=30 m

图 9 不同通信半径的定位误差对比

不断降低的，但是明显看出，在通信半径相同，锚节点比例也相同的条件下，WPDV-Hop 算法的归一化平均定位误差均小于 DV-Hop 算法。

从图 9(a)可以看出，当通信半径 R 取 15 时，WPDV-Hop 算法比 DV-Hop 算法的归一化平均定位误差减小了 7.48%~9.39%。

从图 9(b)可以看出，当 R 取 20 时，WPDV-Hop 算法比 DV-Hop 算法的归一化平均定位误差减小了 6.89%~19.57%。

由图 9(c)可以看出，当 R 取 25 时，WPDV-Hop 算法比 DV-Hop 算法的归一化平均定位误差减小了 7.25%~12.44%。

当 R 取 30 时，WPDV-Hop 算法比 DV-Hop 算法的归一化平均定位误差减小了 9.6%~11.69%。

本文所提的 WPDV-Hop 算法在不同的通信半径下其归一化的平均定位误差随着锚节点比例的变化而变化的结果如图 10 所示。如图 10 所示，当锚节点比例一定，定位误差随通信半径的增大而减小，当 R 取 30 时，定位误差最小。

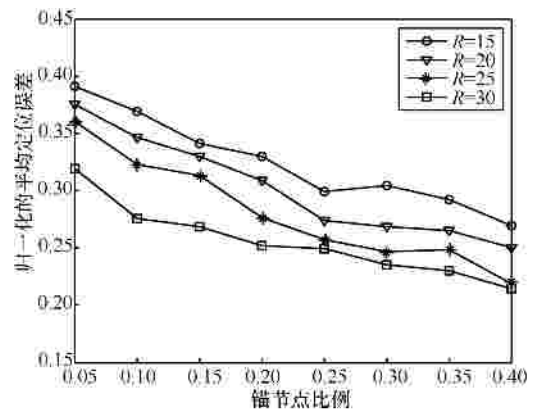


图 10 WPDV-Hop 算法在不同通信半径下的定位误差对比

由仿真结果可以看出，WPDV-Hop 算法的定位误差要明显小于传统的 DV-Hop 算法，但是这 2 种算法的定位误差都不是直线下降的。由于网络中的所有节点都是随机分布的，因而锚节点的数目、节点的总数目发生改变必然会引起网络结构的改变，因而定位误差频繁振动呈现曲线变化而不是直线下降。但是本文所提的 WPDV-Hop 算法其定位误差的总体趋势是呈平稳下降的，并没有太剧烈的振动，因而该算法还是具有良好的稳定性和性能。

5 结束语

针对节点随机分布的网络环境，传统的 DV-

Hop 算法存在定位不准、误差较大的问题,因此本文为了提高定位精度而提出了 WPDV-Hop 算法。改进后的算法针对传统的 DV-Hop 算法做了如下 3 个方面的改进:对锚节点广播的数据分组的结构进行了改进,增加了最大转播跳数这个参数,从而对数据分组的广播范围进行了限制;对选取为参考锚节点的平均每跳距离的误差进行加权处理;用改进的粒子群(PSO)算法对定位结果进行优化。从仿真结果可以看出,本文所提的算法并没有对硬件设施的要求,并且明显降低了无线传感器网络的定位误差,使得定位算法的精度和稳定性有所提高。因此对于节点随机分布的无线传感器网络来说,该算法是一种更好的定位方案。

参考文献:

- [1] 谢涛.无线传感器网络中 DV-Hop 算法的改进[D].西南大学,2012.
XIE T. A Improved DV-Hop Algorithm for Wireless Sensor Network[D]. Southwest University,2012.
- [2] 诸燕平,黄大庆,李勃.基于 AOA 的无线传感器网络节点定位算法[J].传感器与微系统.2010,29(1):98-104.
ZHU Y P,HUANG D Q,LI B.Node localization algorithm based on AOA for WSNS[J].Transducer of Microsystem Technologies,2010,29(1):98-104.
- [3] GIROD L, ESTRIN D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing[A].IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Maui, HI, United States, 2001. 1312-1320.
- [4] 刘影.基于 TDOA 的无线传感器网络节点定位技术研究[D].吉林大学,2008.
LIU Y.The Localization Technology based on TDOA for Wireless Sensor Network Nodes[D].Jilin University,2008.
- [5] 周艳,李海成.基于 RSSI 无线传感器网络空间定位算法[J].通信学报,2009,30(6):75-79.
ZHOU Y,LI H C.Space localization algorithm based RSSI in wireless sensor networks[J].Journal on Communications,2009,30(6):75-79.
- [6] NAGPAL R. Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Amorphous Computer[R]. AI Memo 1666, MIT AI Laboratory, 1999.
- [7] NAGPAL R, SHROBE H, BACHRACH J. Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network[A]. The 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '03)[C]. Palo Alto, 2003.1-16.
- [8] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D.GPS-less low cost outdoor localization for very small devices[J].IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(5):28-34.
- [9] NICULESCU D, NATH B.DV based positioning in ad hoc networks[J].Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1/4): 267-280.
- [10] NICULESCU D, NATH B. Ad hoc positioning system (APS)[A]. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'01)[C]. San Antonio, Texas, USA, 2001.2926-2931.
- [11] SAVVIDES A, HAN C C, SRIVASTAVA M B. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors[A]. Proceedings of Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Rome, Italy, 2001.166-179.
- [12] PRIYANTHA N, CHAKRABORTY A, BALAKRISHNAN H. The cricket location-support system[A]. ACM Conference on Mobile Computing and Networking[C]. MA,USA, 2000.32-43.
- [13] CHEN H, SEZAKI K, DENG P, et al. An improved DV-hop localization algorithm for wireless sensor networks[A].IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2008)[C]. 2008. 1557-1561.
- [14] LIU P X, ZHANG X M, TIAN S, et al. A novel virtual anchor node-based localization algorithm for wireless sensor networks[A]. Sixth International Conference on Networking (ICN'07)[C].2007.9.
- [15] 嵇玮玮,刘中. DV-Hop 定位算法在随机传感器网络中的应用研究[J].电子与信息学报,2008,30(4):970-974.
JI W W,LIU Z.Study on the application of DV-Hop localization algorithms to random sensor networks[J].Journal of Electronics & Information Technology,2008,30(4):970-974.
- [16] LIU Y, QIAN Z H, LIU D, et al. A DV-Hop positioning algorithm for wireless sensor network based on detection probability[A]. 2009 5th International Joint Conference on INC, IMC and IDC (NCM 2009)[C]. 2009.453-456.
- [17] 李成岳.基于 DV-Hop 的无线传感器网络节点定位算法研究[D].吉林大学,2011.
LI C Y.Research on Node Localization Algorithm Based on DV-Hop for wireless Sensor Networks[D]. Jilin University,2011.
- [18] 林朝金,陈晓冰,刘海波.基于平均跳距修正的无线传感器网络节点迭代定位算法[J].通信学报,2009,30(10):107-113.
LIN J Z,CHEN X B,LIU H B.Iterative algorithm for locating nodes in WSN based on modifying average hopping distances[J].Journal on Communications,2009,30(10):107-113.
- [19] 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,2008,30(5):1222-1225.
LIU F,ZHANG H,YANG J. An average one-hop distance estimation algorithm based on weighted disposal in wireless sensor network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(5): 1222-1225.
- [20] 刘影,钱志鸿,刘丹等.基于几何学的无线传感器网络定位算法[J].光子学报,2010,10(21):1435-1438.
LIU Y,QIAN Z H,LIU D, et al.A wireless sensor network localization algorithm based on geometry[J].Journal of Optoelectronics.Laser, 2010,10(21):1435-1438.
- [21] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[A]. IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Perth, 1995. 1942-1948.
- [22] SHI Y H, EBERHART R C. A modified particle swarm optimization[A]. Proc IEEE Internet Confon Evolutionary Computation[C]. Anchorage, Alaska, 1998.69-73.

作者简介:



赵雁航(1989-),女,山东临沂人,吉林大学硕士生,主要研究方向为无线传感器网络定位。

钱志鸿(1957-),男,吉林长春人,吉林大学教授、博士生导师,主要研究方向为无线网络通信技术(包括无线传感器网络技术、RFID技术和物联网技术)等。

尚小航(1986-),女,吉林长春人,吉林大学硕士生,主要研究方向为无线传感器网络技术。

程超(1984-),男,吉林长春人,吉林大学博士生,主要研究方向为无线网络技术。