Improved DV-Hop Algorithm Based on RSSI Hop Quantization and Error Correction

*REN Keqiang** , *PAN Cuimin*

(*School of Information Engineering*, *Jiangxi University of Science and Technology*, *Ganzhou Jiangxi* 341000, *china*)

Abstract: In order to improve the location accuracy of DV-Hop algorithm in the uneven networks, an improved DV-Hop algorithm based on RSSI hop quantification and error correction was proposed. Firstly, the improved algorithm quantified the hop counts by the ratio of RSSI value of the nodes to the reference RSSI value, which converts the integer hops into continuous hops, and recalculated the average single-hop distance of anchor nodes based on the quantized hops. Then, the average single-hop distance of anchor nodes were weighted to revise the average single-hop distance of unknown nodes. Finally, the distance relationships between unknown nodes and nearest anchor node were utilized to correct the error of the estimation coordinates for unknown nodes, which could further reduce the localization error of unknown nodes. The experimental results show that compared with DV-Hop algorithm and comparative reference, the improved algorithm can effectively decrease the effect of cumulative error on distance estimation and enhance the localization accuracy of unknown nodes in the same network environment. The relative localization error of the improved algorithm is 20.7% lower than that of DV-Hop algorithm without increasing hardware overhead.

Key words: wireless sensor network; DV-Hop algorithm; node localization; hop quantization; error correction

EEACC: 6150P **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.05.016

融合 RSSI 跳数量化与误差修正的 DV-Hop 改进算法

任克强*, 潘翠敏

(江西理工大学信息工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 为了提高 DV-Hop 算法在非均匀网络中的定位精度, 提出一种基于 RSSI 跳数量化与误差修正的 DV-Hop 改进算法。改进算法首先利用节点间 RSSI 值与基准 RSSI 值的比值量化节点间跳数, 使整数跳数转化为连续跳数, 并在量化跳数的基础上对锚节点平均跳距进行重估; 然后对各锚节点平均跳距进行加权处理以修正未知节点平均跳距; 最后利用未知节点与最近锚节点的距离关系对未知节点坐标的估计误差进行修正, 以进一步降低节点的定位误差。实验结果表明, 相较于 DV-Hop 算法及相关文献, 改进算法在相同的网络环境下能够有效降低累积误差对距离估算的影响, 提升未知节点定位的精度; 在不增加硬件开销的情况下, 改进算法的相对定位误差比 DV-Hop 算法平均下降了 20.7%。

关键词: 无线传感器网络; DV-Hop 算法; 节点定位; 跳数量化; 误差修正

中图分类号: TP393 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2020)05-0718-07

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由许多随机部署在监测区域内的传感器节点自组织形成的网络系统, 能够对目标区域进行监测并将信息及时传送给观察者[1]。WSN 已经广泛的应用于各行各业, 当采集到的信息与位置密切相关时, 节点定位算法为 WSN 在实际应用中提供了重要的技术支撑[2]。根据是否测量节点间的距离, 可以将已有的 WSN 定位算法分为基于测距的定位和非测距的定位[3-4]。基于测距的定位需要利用超声波或者无线电等技术获取节点间绝对距离或方位信息, 对硬件设施需求高[5-6]。无需测距的定位主要依靠 WSN 的拓扑结构和节点间连通度实现对节点间距离的估计, 无需额外配备相应的测距设施, 但定位性能低[7-8]。

DV-Hop 算法是一种被普遍使用的非测距定位算法, 但是在非均匀的 WSN 中 DV-Hop 算法存在定位精度较低的问题[9]。为提升 DV-Hop 算法的定位性能, 研究人员在原始算法的基础上提出了大量改进。文献[10]用粒子群算法实现 DV-Hop 算法中对节点的定位, 并与多种非测距算法进行比较, 相较于其他定位算法, 所提思路具有更好的定位性能, 但容

收稿日期: 2020-03-30 **修改日期**: 2020-05-18

易陷入局部最优问题。文献[11]通过设置节点间跳数阈值,选择多个位于跳数阈值内锚节点的平均跳距来估计节点间距离,再利用质心算法和最小二乘法估计节点坐标,在一定程度上提高了定位准确度。文献[12]提出将双曲线法融入到 DV-Hop 定位算法中,不仅对节点的平均跳距进行了修正,而且用双曲法对未知节点的坐标进行估计,取得了较好的定位效果,但是,该算法在锚节点数较少时定位效果不佳。文献[13]将 RSSI 算法与 DV-Hop 算法进行融合,利用接收信号强度计算锚节点间的平均跳距偏差,并以此优化未知节点与各锚节点的估计距离,取得了较好的定位效果。文献[14]通过引入校正因子对锚节点平均跳距进行了修正,在定位阶段利用锚节点组的共线度参数选取适合定位的锚节点组,并结合 TLBO 算法实现对未知节点坐标的优化,有效提高了节点的定位精度。文献[15]提出用锚节点平均跳距与定位误差修正未知节点的平均跳距和定位误差,在一定程度上减小了节点定位误差,但该算法在网络密度较低时定位效果不理想。文献[16]利用 RSSI 比值修正节点间跳数,并以修正的跳数为加权系数,对未知节点最近 3 个锚节点的平均跳距进行加权以获取未知节点的平均跳距,使定位结果更加准确,但是未知节点的平均跳距只取决于最近 3 个锚节点存在一定的局限性。

上述算法均不同程度地提升了 DV-Hop 算法的定位性能,但是在非均匀网络中,仍存在因跳数跳距不合理导致的误差积累问题。因此,本文提出一种基于 RSSI 跳数量化与跳距修正的 DV-Hop 改进算法,以降低在计算节点间距离时产生的累积误差,提高节点的定位精度。

1　DV-Hop 算法与分析

1.1　DV-Hop 算法

DV-Hop 算法是一种基于距离矢量路由的非测距定位算法,其定位过程包括下述 3 个阶段:

①所有锚节点将坐标与跳数数据发送给可通信节点,接收节点只保存到每个锚节点的最小跳数,之后将跳数值增加 1 再转发给下一个节点。

②每个锚节点根据保存的其他锚节点坐标与跳数数据,获取各自的平均跳距:

$$\mathrm{HopSize}_i=\frac{\sum_{j\neq i}\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}}{\sum_{j\neq i}h_j} \tag{1}$$

式中:(x_i,y_i)和(x_j,y_j)为锚节点 i 和 j 的坐标,h_j 为锚节点 i 和 j 之间的最小跳数。

锚节点广播各自的平均跳距,未知节点只保留第一次接收的锚节点平均跳距,估计到各锚节点的跳段距离 d_{kj}:

$$d_{kj}=\mathrm{HopSize}_i\times h_j \tag{2}$$

式中:$\mathrm{HopSize}_i$ 为距离未知节点最近锚节点的平均跳距,h_j 为未知节点 k 与锚节点 j 之间的最小跳数。

③当未知节点获得不少于 3 个锚节点的跳段距离之后,可以利用极大似然估计法估计未知节点的坐标[17]。

假设未知节点的坐标为(x,y),锚节点 j 的坐标为(x_j,y_j),$(j=1,2,\cdots,n)$,根据式(2)估计未知节点到锚节点 j 的跳段距离为 d_j,$(j=1,2,\cdots,n)$,可得方程组:

$$\begin{cases}(x_1-x)^2+(y_1-y)^2=d_1^2\\(x_2-x)^2+(y_2-y)^2=d_2^2\\\vdots\\(x_n-x)^2+(y_n-y)^2=d_n^2\end{cases} \tag{3}$$

将式(3)化简整理成 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{B}$ 形式的线性方程组,其中:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}2(x_1-x_n) & 2(y_1-y_n)\\2(x_2-x_n) & 2(y_2-y_n)\\\vdots & \vdots\\2(x_{n-1}-x_n) & 2(y_{n-1}-y_n)\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}x_1^2-x_n^2+y_1^2-y_n^2-d_1^2+d_n^2\\x_2^2-x_n^2+y_2^2-y_n^2-d_2^2+d_n^2\\\vdots\\x_{n-1}^2-x_n^2+y_{n-1}^2-y_n^2-d_{n-1}^2+d_n^2\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x\\y\end{bmatrix} \tag{6}$$

利用最小二乘法可以得到未知节点估计坐标:

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B} \tag{7}$$

1.2　DV-Hop 算法定位误差分析

DV-Hop 算法主要是利用网络的连通度与拓扑结构实现对节点的定位,具有对硬件设施条件要求不高、计算简单等优点,但该算法在非均匀网络中的定位精度较低,主要误差来源有:

①传统 DV-Hop 算法在获取节点间跳数信息时,只要节点间的距离不大于通信半径,就认为节点间的跳数为 1。如图 1 所示,锚节点 B、B1、B2 与未知节点 A 之间的跳数均为 1,根据节点间跳数信息,在图 1 中估计出 A 到 B1 及 A 到 B2 的距离相等,但锚节点 B1、B2 到未知节点 A 的真实距离却各不相同,所以按照这种方法计算节点间的跳数与节点间真实距离存在较大偏差。

②无线传感器网络中节点分布的随机性和不确定性,导致分布在不同区域内的节点密度存在差异。根据 DV-Hop 算法,未知节点的平均跳距只取决于网络中的一个锚节点,当网络中锚节点数量较多时,会造成节点跳距信息的浪费,而且一个锚节点并不能确切地体现整个 WSN 的网络环境;如果锚节点平均跳距本身存在较大误差,且距离未知节点最近,那么误差会被直接传递给未知节点,而未知节点平均跳距是计算节点间距离的一个重要因子,所以这些误差会在计算节点间距离时得到累加。

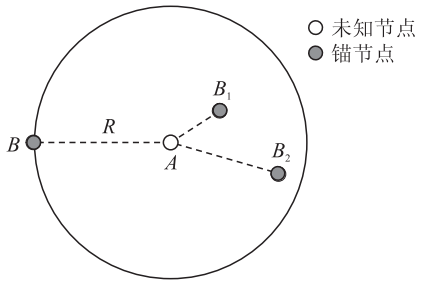

图 1 通信范围内单跳误差示意图

2 本文改进算法

DV-Hop 算法中节点间跳数和平均跳距是利用网络的连通度与拓扑结构,通过洪泛模式获得,当 WSN 节点分布不均匀、拓扑结构不规则时,对节点间跳数和平均跳距的计算会产生误差,从而导致对节点间距离估计的偏差。因此,本文分别从节点间跳数、锚节点平均跳距、未知节点平均跳距及未知节点坐标误差 4 个方面对 DV-Hop 算法进行改进。

2.1 基于 RSSI 的跳数量化

根据传统 DV-Hop 算法的定位原理可知,只要两节点互为邻居节点,无论距离有多远节点间跳数都等于 1,利用这种方法记录节点间跳数并估计节点间距离必然偏离实际距离。针对这个问题,本文在 DV-Hop 算法的基础上融入 RSSI 测距技术,对节点间跳数进行量化,使量化之后的跳数更能反映节点间实际距离关系。

RSSI 测距技术是根据发射端与接收端之间的无线电波损耗,依据特定信号模型把传输损耗转化为距离[18]。使用最广泛的是对数-常态分布模型,它分为 pass loss 模型和遮挡因子两部分。

pass loss 模型:

$$\frac{P(d_0)}{P(d)}=\left(\frac{d}{d_0}\right)^{\eta} \tag{8}$$

式中:$P(d)$和 $P(d_0)$分别为距离发射端 d 和 d_0 处的接收信号强度;η 为路径损耗因子,取值通常在 2~4 之间。

遮挡因子 X_σ 描述了固定距离下接收信号强度的变化,是一个对数正态随机参数。以 dB 为单位并把 X_σ 置入对数-常态分布模型,则对数-常态分布模型可表示为:

$$[P(d)]_{\mathrm{dB}}=[P(d_0)]_{\mathrm{dB}}-10\eta\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_\sigma \tag{9}$$

为了防止单次 RSSI 测量值可能存在较大误差的出现,采用多次接收同一节点的 RSSI 值并取中位数作为最终的 RSSI 值。

选取节点通信半径 R 作为理想单跳距离,并定义节点间距离为 R 时跳数为 1,那么利用通信范围内节点间的真实距离与 R 的比值计算节点间跳数,更能反映出节点间的距离关系。当相邻节点中存在坐标未知的节点时,就无法获得节点间的真实距离,但所有节点都具有采集 RSSI 的功能,所以可以利用未知节点接收的 RSSI 值来量化节点间跳数。

用 T_R 表示节点间的距离为 R 时的接收信号强度,并定义 T_R 为基准 RSSI 值,用邻居节点间的 RSSI 值与基准 RSSI 的比值作为该邻居节点间的跳数,由式(9)可得 T_R 为:

$$T_R=[P(d_0)]_{\mathrm{dB}}-10\eta\lg\left(\frac{R}{d_0}\right)+X_\sigma \tag{10}$$

假设节点 k 收到来自邻居节点的 *RSSI* 值为 R_k,则节点 k 到该邻居节点的跳数为:

$$\mathrm{hop}_k=\frac{R_k}{T_R}\leqslant 1 \tag{11}$$

如图 2 为节点间跳数量化示意图,当 $\mathrm{hop}_k=1$ 时,说明节点在通信半径上,即在图 2 中的 B 点处,此时的跳数为 1;当 $\mathrm{hop}_k<1$ 时,说明节点位于通信半径内,即在图 2 中的 B1 和 B2 点处,此时的跳数小于 1。

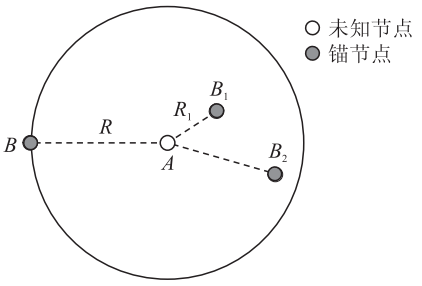

图 2 节点间跳数量化示意图

通过引入 RSSI 测距技术对节点间的跳数进行量化,使节点间整数跳数连续化,更能反映实际节点间的相对距离,使得节点间距离估计更加准确。

2.2 锚节点平均跳距的修正

锚节点的平均跳距对节点间距离的估算有很大影响,利用式(1)获得的锚节点平均跳距是个均值,但是由于节点分布不均匀,相邻节点的距离实际上

是不同的,所以利用该均值与跳数信息估计节点间距离会存在一定误差。为了减小锚节点平均跳距对节点间距离估计的影响,需要对锚节点平均跳距进行修正。

假设锚节点 i 和 j 的坐标为(x_i,y_i)和(x_j,y_j),根据更新的量化跳数,利用式(1)可重新获得锚节点 i 的平均跳距。

$$\begin{aligned}\mathrm{HopSize}_i'&=\frac{\sum_{j\neq i}\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}}{\sum_{j\neq i}\mathrm{hop}_j}\\&=\frac{\sum_{j\neq i}\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}}{\sum_{j\neq i}\left(\mathrm{hop}_{j-1}+\frac{R_j}{T_R}\right)}\\&=\frac{\sum_{j\neq i}\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}}{\sum_{j\neq i}\left(\frac{R_1}{T_R}+\frac{R_2}{T_R}+\cdots+\frac{R_j}{T_R}\right)}\\&=\frac{T_R\times\sum_{j\neq i}\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}}{\sum_{j\neq i}(R_1+R_2+\cdots+R_j)}\end{aligned}\tag{12}$$

式中:hop_j 为锚节点 i 和 j 之间的最小量化跳数,R_j 为锚节点 j 前一跳节点接收到锚节点 j 的 RSSI 值。

根据各锚节点的量化跳数和式(12),可以计算出锚节点 i 和 j 的跳段距离:

$$d_{ij}=\mathrm{HopSize}_i'\times\mathrm{hop}_j\tag{13}$$

通过式(13)及锚节点的坐标信息计算锚节点 i 和 j 的跳段距离与真实距离偏差:

$$\Delta d_{ij}=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}-d_{ij}\tag{14}$$

根据式(14)能够计算出锚节点 i 到网络中所有锚节点实际距离与跳段距离的总差值,再将总差值除以总跳数可得锚节点 i 的平均跳距偏差:

$$\varepsilon_i=\frac{\sum_{j\neq i}\Delta d_{ij}}{\sum_{j\neq i}\mathrm{hop}_j}\tag{15}$$

利用锚节点 i 的平均跳距偏差可以得到修正之后的锚节点平均跳距:

$$d\mathrm{Hop}_i=\mathrm{HopSize}_i'+\varepsilon_i\tag{16}$$

2.3　未知节点平均跳距的修正

未知节点利用最近锚节点确定自身平均跳距的方法虽然简单,但单个锚节点并不能体现整个网络的情况。为避免未知节点从单一锚节点获取平均跳距可能带来的问题,在计算未知节点平均跳距时,应该综合考虑网络中的锚节点。由于未知节点与相距较近锚节点附近的网络环境更接近,节点间的连通度差异也更小,因此,本文以未知节点到各锚节点的跳数信息为权值,采用加权策略将未知节点收到的所有平均跳距都参与其自身平均跳距的计算。

假设未知节点 A 收到 n 个锚节点平均跳距,则 A 对 n 个锚节点平均跳距的权值通过式(17)获得。

$$\omega_i=\frac{\mathrm{hop}_{\max}-\mathrm{hop}_i+1}{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{hop}_{\max}-\mathrm{hop}_i+1}\tag{17}$$

式中:$\mathrm{hop}_{\max}$为 A 记录的到 n 个锚节点的跳数最大值,hop_i 为 A 记录的到锚节点 i 的跳数值。

A 对接收到的 n 个锚节点平均跳距做出基于 ω_i 的加权,并将结果作为 A 的最终平均跳距:

$$\mathrm{HopSize}_A=\sum_{i=1}^{n}\omega_i\times d\mathrm{Hop}_i\tag{18}$$

通过对 A 接收到的锚节点平均跳距进行加权,每个锚节点平均跳距都被赋予与 A 跳数负相关的权值,距离 A 跳数较多的锚节点相应的权重就更小。

2.4　未知节点坐标误差的修正

根据未知节点记录的量化跳数及修正的平均跳距,可以得到未知节点的估计坐标,该估计坐标与真实坐标到各锚节点的距离是存在差异的。为减小计算量,只考虑估计坐标与真实坐标到未知节点最近锚节点的距离差异,现实中估计坐标与真实坐标到未知节点最近锚节点的距离应该相等,所以对估计坐标以满足现实情况进行修正。

由于 RSSI 测距技术能够较准确地估计出相距较近的节点间距离,所以利用 RSSI 值估计未知节点与最近锚节点的距离,并把该距离当作未知节点到最近锚节点的真实距离。

假设利用未知节点 A 的修正平均跳距及到各锚节点的连续跳数估计 A 的坐标为$(\hat{x},\hat{y})$,该估计坐标与 A 最近锚节点 $B(x_B,y_B)$的距离为 $d=\sqrt{(x_B-\hat{x})^2+(y_B-\hat{y})^2}$,用 RSSI 测距技术估计 A 与最近锚节点的距离为 dr,通过比较 d 和 dr 是否相同决定是否对 A 的估计坐标进行修正。设修正之后的坐标为(x',y'),修正的目的是使修正之后的坐标到 A 最近锚节点的距离与 A 到最近锚节点的距离相等,最快也是最简单的修正方法是在估计坐标与 A 最近锚节点的连线上对估计坐标进行修正,根据式(19)可以得到对节点 A 的估计坐标修正结果。

$$\begin{cases}x'=\hat{x}+\left(\dfrac{d-dr}{d}\right)\times(x_B-\hat{x})\\y'=\hat{y}+\left(\dfrac{d-dr}{d}\right)\times(y_B-\hat{y})\end{cases}\tag{19}$$

下面以图 3 为例,说明未知节点 A 坐标误差的修正过程。图 3 中 B、B1 和 B2 为参与 A 定位的其中 3 个锚节点,且 B 是 A 的最近锚节点,根据 A 的修正平均跳距和到各锚节点的连续跳数,利用最小二乘法可以得到 A 的估计坐标,用 C 表示。根据 B 与 C 的坐标可以计算出 C 到 B 的距离 d,用 RSSI 测距技术估计出 A 与 B 的距离 dr,$d \neq dr$ 说明估计坐标 C 不够精确,与 A 的真实坐标存在误差。应使 d 为满足 $d=dr$ 的关系对估计坐标 C 进行修正,即通过式(19)沿着 C 与 B 连线的方向将 C 修正到一个新的位置 D 处,修正之后的位置 D 到 B 的距离与 dr 相等,更接近 A 的真实位置,进一步减小了定位误差。

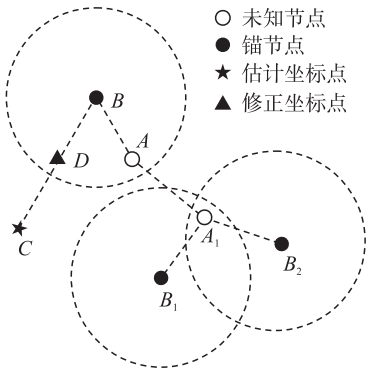

图 3 未知节点 A 坐标修正示意图

2.5 改进算法的实现

改进算法的伪代码如下:

本文改进算法

量化节点间跳数:利用直接邻居节点间的 RSSI 值 R_k 与基准 RSSI 值 T_R 的比值作为邻居节点间的跳数;锚节点 B_i 广播的数据包为 $P=\{B_i,(x_i,y_i),\text{Hopcount}_i,R_k\}$,$\text{Hopcount}_i$ 是当前数据包的跳数,初始化为 0;$\text{Hopcount}_i'$为节点记录的到锚节点 B_i 的跳数。

```
for each anchor node B_i broadcast packet to the network
  if the node A didn't receive a packet from anchor B_i
    then Hopcount_i' = Hopcount_i + R_k/T_R
      Hopcount_i = Hopcount_i'
      rebroadcast(P)
  else
    if Hopcount_i' > Hopcount_i + R_k/T_R
      then Hopcount_i' = Hopcount_i + R_k/T_R
        Hopcount_i = Hopcount_i'
        rebroadcast(P)
      else ignore(P)
    end if
  end if
done
```

节点平均跳距修正:通过节点间量化跳数和相应的距离关系修正节点的平均跳距,包括锚节点 B_i 和未知节点 A_k。

```
while anchor nodes stop broadcasting packets do
  for each anchor nodeB_i and unknown node A_k
    correct the single-hop distance of B_i by Eq.(12)~(16)
    correct the single-hop distance of A_k by Eq.(17)~(18)
  done
done
```

未知节点坐标误差修正:未知节点获得 N_D 个到锚节点的跳段距离;$C(\hat{x},\hat{y})$ 为未知节点的估计坐标;B_n 为未知节点距离最近的锚节点。

```
if N_D ≥ 3
  then calculate the estimated coordinates C(x̂, ŷ)
    calculate the distance dbetween C and B_n
    estimating the distance drbetween unknown node
    and B_n by RSSI technique
    if d ≠ dr
      then correct C to a new coordinates by Eq.(19)
    end if
end if
```

改进算法的流程图如图 4 所示。

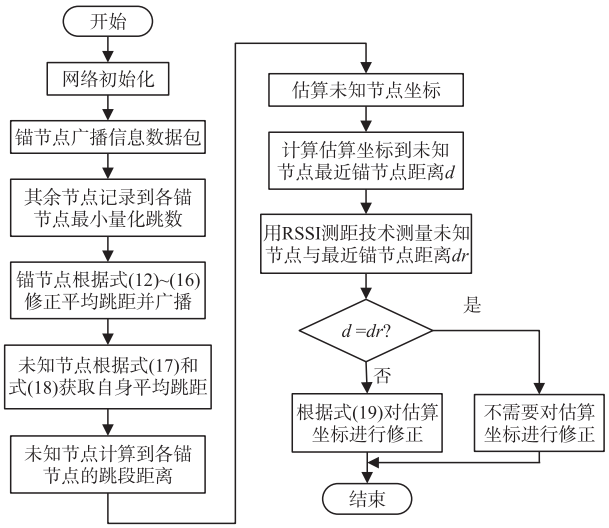

图 4 本文改进算法流程图

3 仿真结果与分析

为了验证本文算法的定位性能,利用 MATLAB 对 DV-Hop 算法、文献[11]算法、文献[12]算法及本文算法进行仿真比较。仿真实验环境:节点被随机分布在 100 m×100 m 的区域内,节点的通信半径为 R,实验结果取仿真 100 次的平均值。

选定相对定位误差 E_r 作为定位效果的评价标准:

$$E_r=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sqrt{(x_i-x'_i)^2+(y_i-y'_i)^2}}{N\times R} \tag{20}$$

式中:(x_i,y_i) 和 (x'_i,y'_i) 分别为未知节点的真实坐标和估计坐标,N 为未知节点的数量。

图 5 是通信半径 R 从 15 m 变化到 40 m 的情形

下,DV-Hop 算法、文献[11]算法、文献[12]算法及本文算法的相对定位误差对比结果,其中网络节点总数为 150 个,锚节点数为 20 个。从仿真结果可以看出,R 的增大使得各算法的相对定位误差都在减小,且都逐渐趋于平稳,这是因为节点通信半径的增加使得锚节点可覆盖范围增大,参与定位的锚节点增多。从总体上看,在通信半径都相同的情况,本文算法的相对定位误差始终最小,相比 DV-Hop 算法、文献[11]算法和文献[12]算法分别下降了约 31.4%~11.8%、7.3%~3.6%和 4.9%~1.3%。由此可见,本文算法具有更高的定位精度,原因在于本文算法对节点间跳数进行了量化,使跳数信息更能反映节点间的相对距离,减小了因节点间跳数不合理造成的测距误差。

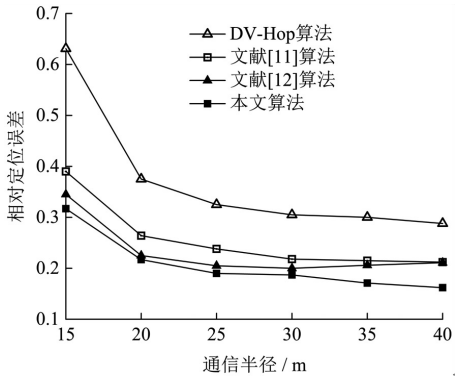

图 5　不同通信半径的相对定位误差比较

图 6 是锚节点数从 5 个变化到 30 个的情形下,DV-Hop 算法、文献[11]算法、文献[12]算法及本文算法的相对定位误差对比结果,其中网络节点总数为 150 个,通信半径 $R=20$ m。从图 6 的仿真结果可以看出,锚节点数从 5 个以 5 为步长增加到 30 个的过程中,4 种算法的相对定位误差都有不同程度的减小。当锚节点数增加到 10 个之后,DV-Hop 算法整体表现较为平缓;本文算法的相对定位误差在锚节点数从 5 个增加到 15 个时下降明显,之后随着锚节点数从 15 个增加到 30 个也趋于平缓。其次,在锚节点密度较低时本文算法也具有更低的相对定位误差,本文算法在锚节点密度较低时也具有更低的相对定位误差,当锚节点数为 5 个时,本文算法的定位精度较 DV-Hop 算法、文献[11]算法、文献[12]算法分别提升了约 22.25%、9%和 14.13%,而且本文算法的相对定位误差曲线一直处于下方,说明本文算法具有更低的定位误差,这是由于本文将未知节点接收的多个平均跳距进行加权处理,进一步减小了误差累积。

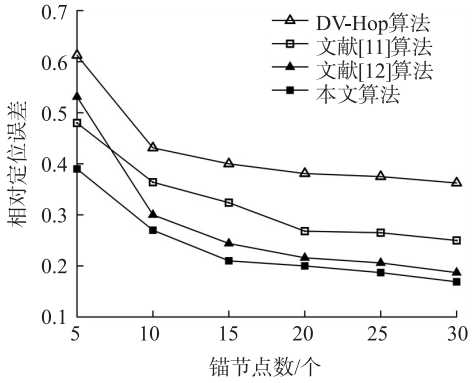

图 6　不同锚节点数的相对定位误差比较

图 7 是节点总数从 100 个变化到 350 个的情形下,DV-Hop 算法、文献[11]算法、文献[12]算法及本文算法的相对定位误差对比结果,其中锚节点数为 20 个,通信半径 $R=20$ m。从仿真结果可以看出,增多网络中节点总数,各个算法的定位性能整体都有提升,且在节点总数增加到 150 个之后变化较为平缓。当节点总数为 100 个时,本文算法的定位性能比 DV-Hop 算法和文献[12]算法分别提升了约 23.7%和 3.2%,说明本文算法在网络中节点总数较少时也能获得较好的定位结果,这是因为本文算法不仅对节点间的距离进行了优化,而且对未知节点的坐标进行了修正。图 7 的对比结果说明,增多 WSN 中节点总数能够提升节点的定位性能,原因在于节点总数增多,使得网络中节点密度增加、网络的拓扑结构更加规则,保证了网络的连通性。

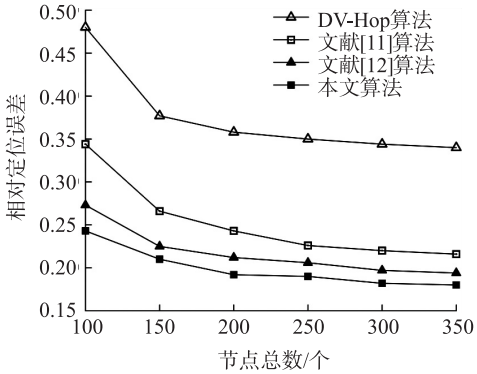

图 7　不同节点总数的相对定位误差比较

图 8 是节点总数为 200 个,锚节点比例为 0.25,通信半径取 $R=40$ m 时,DV-Hop 算法与本文算法对

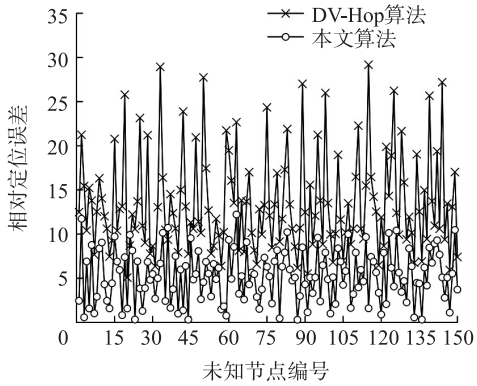

图 8　未知节点定位误差比较结果

未知节点的定位误差对比结果。由图 8 可以看出，本文算法的定位误差明显低于 DV-Hop 算法，且本文算法有效地抑制了较大定位误差的出现。

4 结束语

针对 DV-Hop 算法在非均匀网络中因跳数跳距不合理导致误差累积的问题，提出一种节点跳数量化与误差修正的 DV-Hop 改进算法。改进算法分别从跳数量化、锚节点和未知节点平均跳距修正及节点坐标误差修正几个方面对 DV-Hop 算法进行了改进，并在节点通信半径、锚节点数和节点数量变化的 WSN 环境下对算法的定位性能进行实验。实验结果表明，本文改进算法表现出比 DV-Hop 算法和相关算法更优的定位效果，有效提升了对节点定位的准确度。如何进一步减小距离估计过程产生的累积误差，提高节点的定位准确度是后续重点研究的工作。

参考文献：

[1] Tomic S, Beko K, Dinis R. Improvements of DV-Hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Telecommunication Systems, 2016, 61(1): 93-106.

[2] Yang X Y, Zhang W L, Song Q X. Improvement of DV-Hop Algorithm Based on RSSI Ratio Correction[J]. International Journal of Online and Biomedical Modern Engineering, 2018, 14(5): 159-171.

[3] 林维维，姚英彪，邹柯，等. 基于校正矢量的分布式 DV-Hop 求精算法[J]. 计算机研究与发展，2019，56(3)：585-593.

[4] Lobiyal D K, Kumar S. Novel DV-Hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Telecommunication Systems, 2017, 64(3): 509-524.

[5] Shen S K, Yang B, Qian K G, et al. On Improved DV-Hop Localization Algorithm for Accurate Node Localization in Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(3): 658-666.

[6] Feng X, Chen Z F, Liu Z. A New Range-Free Algorithm Based on Hop Correction of RSSI[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 34(4): 1205-1212.

[7] 方旺盛，黄辉. DV-HOP 三重定位算法[J]. 江西理工大学学报，2017，38(3)：92-96.

[8] 余修武，胡沐芳，刘永，等. 多半径误差修正自适应布谷鸟优化 DV-HOP 定位算法[J]. 西南交通大学学报，2018，53(6)：1123-1129.

[9] Wang Y, Fang Z, Chen L. A New Type of Weighted DV-Hop Algorithm Based on Correction Factor in WSNs[J]. Journal of Communications, 2014, 9(9), 699-705.

[10] Mass-Sanchez J, Ruiz-Ibarra E, Espinoza-Ruiz A, et al. A Comparative of Range Free Localization Algorithms and DV-Hop Using the Particle Swarm Optimization Algorithm[C]//Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference. IEEE, 2018: 150-157.

[11] 向满天，王胜，杨友华，等. 基于阈值机制与距离校正的 WSN 改进 DV-HOP 定位算法[J]. 传感技术学报，2016，29(6)：920-926.

[12] Mass-Sanchez J, Ruiz-Ibarra E, Cortez-Gonzalez J, et al. Weighted Hyperbolic DV-Hop Positioning Node Localization Algorithm in WSNs[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(4): 5011-5033.

[13] 刘三阳，胡亚静，张朝辉. 基于 RSSI 测距的 DV-Hop 算法[J. 控制与决策，2017，32(10)：1900-1904.

[14] Sharma G, Kumar A. Improved DV-Hop Localization Algorithm Using Teaching Learning Based Optimization for Wireless Sensor Networks[J]. Telecommunication systems, 2018, 67(2), 163-178.

[15] 王兴，聂云峰，徐飞飞. 一种基于坐标改正的改进 DV-Hop 定位算法[J]. 传感技术学报，2017，30(10)：1560-1564.

[16] 高雷祥，黄辉，方旺盛. 基于 RSSI 值跳数修正和跳距加权处理的 DV-HOP 算法[J]. 江西理工大学学报，2015，36(5)：80-84.

[17] 李文军，华强，谭立东，等. DV-HOP 和接收信号强度指示结合的改进算法[J]. 吉林大学学报(工学版)，2019，5(49)：1689-1695.

[18] Xue W X, Qiu W N, Hua X H. Improved Wi-Fi RSSI Measurement for Indoor Localization[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7): 1224-1230.

任克强(1959—)，男，教授，硕士研究生导师，主要研究方向为无线传感器网络、图像与视频处理、信息隐藏，jxrenkeqiang@163.com；

潘翠敏(1995—)，女，硕士研究生，主要研究方向为无线传感器网络。