

一种具有连续跳数值的三维 DV-Hop 改进算法

程 杰^{1,2,3}, 董云玲^{1,2,3}, 陈嘉兴^{1,4}, 刘志华^{1,2,3}

(1. 河北师范大学计算机与网络空间安全学院, 河北石家庄 050024; 2. 河北师范大学河北省网络与信息安全重点实验室, 河北石家庄 050024; 3. 河北师范大学河北省供应链大数据分析与安全工程研究中心, 河北石家庄 050024; 4. 石家庄科技工程职业学院, 河北石家庄 050800)

摘 要: 设计精确的定位算法是无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)的研究热点. 针对 DV-Hop (Distance Vector-Hop) 定位算法中节点间距离估计误差较大导致定位不精确的问题, 提出了一种具有连续跳数值的三维 DV-Hop 改进算法. 探究了邻居节点间的距离与相应节点位置和通信半径构成的相交球体体积之间的关系, 提出了连续跳数值的定义, 并通过参数修正给出了其计算方法. 通过仿真实验探究了网络环境对参数的影响并确定了参数的取值, 使用连续跳数值代替 DV-Hop 算法中的跳数来降低节点间距离估计误差. 仿真实验表明, 该算法在不增加算法复杂度以及额外硬件的情况下有效地降低了定位误差.

关键词: 无线传感器网络; DV-Hop 定位; 相交球体; 连续跳数值; 参数修正

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)11-2122-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.11.005

An Improved Three-Dimensional DV-Hop Algorithm with Continuous Hop Value

CHENG Jie^{1,2,3}, DONG Yun-ling^{1,2,3}, CHEN Jia-xing^{1,4}, LIU Zhi-hua^{1,2,3}

(1. College of Computer and Cyber Security, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;

2. Key Laboratory of Network and Information Security, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;

3. Hebei Provincial Engineering Research Center for Supply Chain Big Data Analytics and Data Security, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;

4. Shijiazhuang Vocational College for Scientific and Technical Engineering, Shijiazhuang, Hebei 050800, China)

Abstract: Designing accurate localization algorithms is a research focus in WSNs (Wireless Sensor Networks). Aiming at the problem that the large estimated distance error between nodes could result in inaccurate localization in Distance Vector-Hop (DV-Hop), we proposed an improved three-dimensional DV-Hop algorithm with continuous hop value in this paper. Firstly, the algorithm explored the relationship between the distance of neighbor nodes and the volume of intersecting spheres which is composed of the corresponding node locations and communication radius. In addition, the definition and parameter modification calculation formula of continuous hop value were put forward. Then we explored the influence of network environment on parameters and determined parameters value through simulation. The accurate continuous hop value was used instead of the hop in DV-Hop to reduce the estimated distance error between nodes. The simulation results show that the algorithm effectively reduces the localization error without increasing the complexity of the algorithm and additional hardware.

Key words: wireless sensor networks; DV-Hop localization; intersecting sphere; continuous hop value; parameter modification

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)

是物联网(Internet of Things, IoT)基础信息的收集工具^[1]. WSNs 使 IoT 能够获得所需的监测信息. 节点位置是 WSNs 监测信息采集的关键, 没有位置信息, 监测信

息将失去意义^[2]. 因此,节点定位成为 WSNs 的关键问题之一,也是该领域的研究热点^[3]. 节点位置的准确性决定了监测信息是否能够与感知到的现象源相关联,因此保证节点获取到精确的位置信息至关重要^[4]. 然而在大型 WSNs 中,为每个传感器节点配备 GPS (Global Positioning System) 芯片来获取位置信息是不现实的^[5]. 更加合理的解决方案是让一部分传感器节点通过配备 GPS 获得自身位置,这些节点称为锚节点,其余节点(位置未知的节点)的位置可以通过与锚节点通信来估计^[6].

根据定位过程中是否需要测量节点间的距离或方位,定位算法可以分为基于测距的定位算法和无需测距的定位算法^[7]. 基于测距的定位算法所需的测距技术主要有接收信号强度指示 (Receiver Signal Strength Indicator, RSSI)、到达时间 (Time of Arrival, TOA)、到达时间差 (Time Difference of Arrival, TDOA)、到达角度 (Angle of Arrival, AOA)^[8] 等. 无需测距的定位算法主要有质心算法、凸规划算法、DV-Hop 算法^[9] 等.

在无需测距的定位算法中, DV-Hop 由于简单易扩展而受到越来越多研究者的关注^[10]. 通过分析传统的 DV-Hop 算法,发现影响其定位精度的因素主要有两个:一个是未知节点到锚节点的距离估计误差,另一个是求节点位置时算法的性能. 目前对传统 DV-Hop 的改进大多都是针对这两个方面研究的^[11]. 针对距离估计误差的改进主要有两种方式:(1)通过优化算法如蝙蝠算法^[12]来降低距离估计误差;(2)通过改进跳数或跳距来降低距离估计误差,如 CUI L 等人^[8]提出使用互为邻居节点的两个节点共同的邻居节点个数与这两个节点通信区域的共有面积来改进跳数. 祁晓瑛等人^[9]提出多通信半径算法得到精确的跳数并加权计算跳距. 尼迎波等人^[13]在多通信半径基础上提出使用余弦定理计算跳距. SHI Q 等人^[14]提出节点路径匹配算法来优化跳距. SHIKAI S 等人^[15]提出基于概率信息的信标节点选择策略,利用信标节点之间的实际距离与估计距离优化跳距. KEQIANG R 等人^[16]利用节点的通信半径与影响节点跳数的相关参数优化跳数,并结合最小均方误差与单跳平均误差优化跳距. YEHAI C 等人^[17]在多通信半径定位算法基础上使用优化适应度函数后的蛙跳算法优化跳距. CAI X 等人^[18]通过分析每跳的平均距离、节点数和理论每跳平均距离之间的关系,建立了多目标定位模型. CHEIKHROUHOU O 等人^[19]提出了利用 RSSI 改进 DV-Hop 定位算法,通过 1 跳节点之间的 RSSI 值优化跳数. HAN D 等人^[20]利用优化后的差分进化算法优化跳距. MESSOUS S 等人^[21]提出基于未知节点的递归位置计算策略,利用多项式逼近优化跳距. YU X 等人^[22]根据几何方法估算节点之间的距离并结合校正因

子优化跳数,最后根据锚节点权重选择未知节点的跳距. 而针对坐标计算误差的改进主要是通过数学公式如牛顿迭代^[11]、聚类方法改进的多边定位^[2]等或者优化算法如粒子群算法^[14,23-25]、蝙蝠算法^[26]、遗传算法^[17]、混合杜鹃搜索算法^[22]、细菌觅食和萤火虫耦合算法^[27]等来降低坐标计算误差.

一些优化算法在提高定位精度的同时也增加了算法复杂度,如文献[8]使用互为邻居节点的两个节点通信区域的面积、通信区域内的节点数和邻居节点间距离的关系优化距离估计误差,但算法步骤多,对估计距离的改进并不明显,其后虽然使用差分进化优化坐标提高了精度,但也增加了算法复杂度. 文献[9]通过细分跳数降低距离估计误差,由于节点要以不同的通信半径进行广播,通信负担略大. 在不过分增大通信负担的情况下,节点跳数值离散且误差较大,其后虽然通过加权方式修正了平均跳距,但仍存在较大的距离估计误差.

本文在三维 DV-Hop 算法和 CUI L 等人提出的二维定位算法^[8]基础上,提出了三维 DV-Hop 改进算法 VNDV-Hop (Volume Node Distance Vector-Hop). 该算法使用互为邻居节点的两个节点共同的邻居节点数目和这两个节点全部的邻居节点数目之比代替相应节点所在区域的体积比,反解出连续跳数值与节点比的关系式,并使用参数修正后的关系式计算连续跳数值,进而降低距离估计误差,提高 DV-Hop 定位精度.

2 相关工作

2.1 DV-Hop 算法

DV-Hop 算法是一种基于多跳测距的无距离测距技术^[28],主要分为以下两个阶段:

第一阶段 距离估计 节点相互通信,记录所有节点到锚节点的最小跳数以及锚节点坐标,使用式(1)计算节点的平均跳距(未知节点把最先接收到的锚节点的平均跳距作为自身跳距).

$$c_i = \frac{\sum_{i \neq j} \sqrt{(x_i^b - x_j^b)^2 + (y_i^b - y_j^b)^2 + (z_i^b - z_j^b)^2}}{\sum_{i \neq j} h_{ij}^p}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n_b) \quad (1)$$

其中 (x_i^b, y_i^b, z_i^b) 、 (x_j^b, y_j^b, z_j^b) 分别表示锚节点 N_i^b 、 N_j^b 的坐标, h_{ij}^p 表示 N_i^b 和 N_j^b 之间的最小跳数, n_b 表示锚节点数, c_i 表示锚节点 N_i^b 的平均跳距.

使用式(2)求得锚节点与未知节点之间的距离.

$$\hat{d}_{ik} = \hat{c}_k \times h_{ik}^p \quad (i = 1, 2, \dots, n_b; k = 1, 2, \dots, n_u) \quad (2)$$

其中 $\hat{d}_{ik}$ 表示锚节点 N_i^b 与未知节点 N_k^u 之间的估计距离, $\hat{c}_k$ 表示未知节点 N_k^u 的跳距, h_{ik}^p 表示 N_i^b 与 N_k^u 之间的最小跳数, n_b 、 n_u 分别表示锚节点数、未知节点数.

第二阶段 未知节点位置估计 通过第一阶段得到未知节点与锚节点之间的距离. 当未知节点获得超过 4 个锚节点的距离信息时, 利用最小二乘法计算未知节点的位置.

2.2 误差分析

DV-Hop 算法的误差主要产生在 2.1 节所述的两个阶段. 第一阶段的误差会直接累积到第二阶段, 造成更大的定位误差.

如图 1 所示, 设所有节点的通信半径均为 R , N_2 到 N_7 均为 N_1 的 1 跳节点, 但实际上它们与 N_1 的距离并不一样. 由跳数产生的误差会影响跳距的计算, 跳数和跳距直接影响了第二阶段所需的节点间估计距离的精确性. 本文在改进 DV-Hop 算法时充分考虑了算法复杂度对算法的影响, 使用更精确的连续跳数值对三维 DV-Hop 算法进行改进.

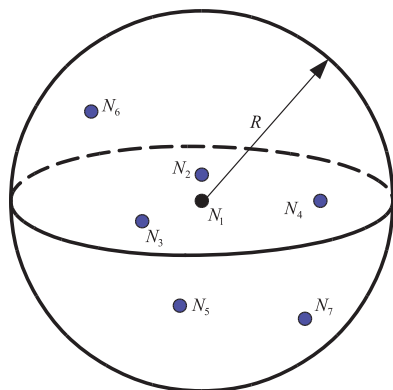


图1 DV-Hop跳数误差分析图

3 VNDV-Hop 定位算法

VNDV-Hop 算法对三维 DV-Hop 算法进行了改进, 用互为邻居节点的两个节点共同的邻居节点数目和这两个节点的全部邻居节点数目之比代替相应节点所在区域的体积比, 反解出连续跳数值与节点比的关系式, 并通过仿真对该关系式进行参数修正.

3.1 关系式

如图 2 所示, 节点的通信半径为 R , 节点 N_i 和 N_j 之间的距离为 d_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$), 其中 n 为节点总数, 且 N_i, N_j 互为邻居节点. 为了降低跳数引起的误差, 本文定义了与 d_{ij} 有关的连续跳数值 h_{ij} . 已知 d_{ij} 才可以计算 h_{ij} . 虽然 d_{ij} 与 N_i, N_j 和 R 构成的两个球体相交部分的体积存在关系, 但这部分体积在计算上存在一定难度. 本文尝试用节点数目比来估计相应节点所在的空间体的体积比, 下文将通过连续跳数值、体积比和节点比的关系式.

从 2.2 节中对 DV-Hop 算法进行的误差分析可知, 邻居节点间跳数相等而距离不等是引起 DV-Hop 误差

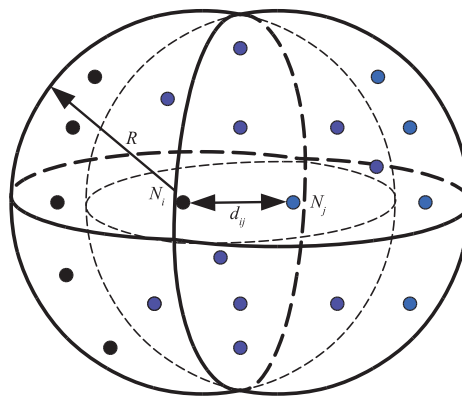


图2 邻居节点示意图

的根本原因. 因此本文定义了连续跳数值, 利用节点间距离对跳数进行优化.

定义 1 设互为邻居节点的 N_i 和 N_j 之间的距离为 d_{ij} , 节点的通信半径为 R , 定义连续跳数值 h_{ij} 为:

$$h_{ij} = \frac{d_{ij}}{R} \quad (3)$$

由于两节点间的距离 $d_{ij} \in (0, R]$, 所以 $h_{ij} \in (0, 1]$. 由图 2 可知, d_{ij} 与节点 N_i, N_j 和 R 构成的两个球体相交部分的体积存在关系. 虽然计算体积存在难度, 但是体积之间的比例可以通过相应区域内的节点数目的比例进行估算. 为了便于表述, 本文将体积之间的比例关系定义为体积比.

定义 2 在节点 N_i 和其邻居节点 N_j 的 1 跳范围内, 设能与 N_i 和 N_j 都通信的节点所在区域的体积为 $V_{i \cap j}$, 能与 N_i 或 N_j 通信的区域的体积为 $V_{i \cup j}$, 则体积比 Vr_{ij} 为:

$$Vr_{ij} = \frac{V_{i \cap j}}{V_{i \cup j}} \quad (4)$$

由图 2 可知, $V_{i \cap j}$ 和 $V_{i \cup j}$ 均可用旋转体体积公式求得. 为了说明 $V_{i \cap j}$ 和 $V_{i \cup j}$ 的计算过程, 以节点 N_i 为原点建立平面直角坐标系, 利用坐标系表示节点 N_i 和 N_j 的位置与通信半径 R 之间的关系, 如图 3 所示.

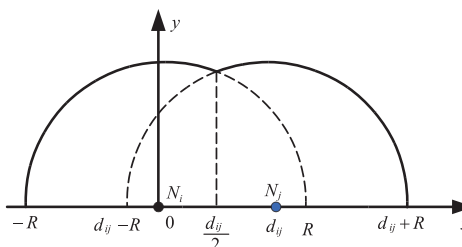


图3 节点位置平面图

$V_{i \cap j}$ 为由曲线 $y = \sqrt{R^2 - (x - d_{ij})^2}$ ($d_{ij} - R \leq x \leq \frac{d_{ij}}{2}$) 和 $y = \sqrt{R^2 - x^2}$ ($\frac{d_{ij}}{2} \leq x \leq R$) 绕 x 轴旋转一周而成的旋转体的

体积. 根据对称性, $V_{i \cap j}$ 等于由 $y = \sqrt{R^2 - x^2}$ ($\frac{d_{ij}}{2} \leq x \leq R$) 绕 x 轴旋转一周而成的旋转体体积的 2 倍, 根据旋转体体积公式得:

$$V_{i \cap j} = 2 \int_{\frac{d_{ij}}{2}}^R \pi(R^2 - x^2) dx = \frac{4\pi R^3}{3} - \pi R^2 d_{ij} + \frac{\pi d_{ij}^3}{12} \quad (5)$$

同上所述, $V_{i \cup j}$ 等于由 $y = \sqrt{R^2 - x^2}$ ($-R \leq x \leq \frac{d_{ij}}{2}$) 绕 x 轴旋转一周而成的旋转体体积的 2 倍, 即:

$$V_{i \cup j} = 2 \int_{-R}^{\frac{d_{ij}}{2}} \pi(R^2 - x^2) dx = \frac{4\pi R^3}{3} + \pi R^2 d_{ij} - \frac{\pi d_{ij}^3}{12} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)带入式(4)可得:

$$V_{r_{ij}} = \frac{V_{i \cap j}}{V_{i \cup j}} = \frac{16R^3 - 12d_{ij}R^2 + d_{ij}^3}{16R^3 + 12d_{ij}R^2 - d_{ij}^3} \quad (7)$$

为了确定 $V_{r_{ij}}$ 的取值范围, $V_{r_{ij}}$ 对 d_{ij} 求导得:

$$V_{r_{ij}}'(d_{ij}) = \frac{-96R^3}{64R^4 + 96R^3 d_{ij} + 52R^2 d_{ij}^2 + 16R d_{ij}^3 + 7d_{ij}^4 + 8d_{ij}^5/a} \quad (8)$$

其中 $a = 2R - d_{ij}$, 由 $d_{ij} \in (0, R]$ 得 $V_{r_{ij}}'(d_{ij}) < 0$, 所以:

$$V_{r_{ij}} \in \left[\frac{5}{27}, 1 \right) \quad (9)$$

当 d_{ij} 为自变量, R 为常数时, 由式(8)可知, $V_{r_{ij}}$ 在 $d_{ij} \in (0, R]$ 上为单调递减函数. 结合式(3)可知, $V_{r_{ij}}(h_{ij})$ 在 $h_{ij} \in (0, 1]$ 上为单调递减函数. 因此, $V_{r_{ij}}(h_{ij})$ 必然存在反函数, 结合式(9)和反函数的性质, 提出如下定理.

定理 1 当 $V_{r_{ij}} \in \left[\frac{5}{27}, 1 \right)$ 时, $h_{ij}(V_{r_{ij}}) \in (0, 1]$.

证明 结合式(3), 式(7)可化简为:

$$V_{r_{ij}} = 1 - \frac{24h_{ij} - 2h_{ij}^3}{16 + 12h_{ij} - h_{ij}^3} \quad (10)$$

移项化简可得:

$$\frac{1}{1 - V_{r_{ij}}} = \frac{8}{12h_{ij} - h_{ij}^3} + \frac{1}{2} \quad (11)$$

化简式(11)可得:

$$h_{ij}^3 - 12h_{ij} + b = 0 \quad (12)$$

其中 $b = \frac{8}{1/(1 - V_{r_{ij}}) - 1/2}$, 由式(9)得:

$$b \in (0, 11] \quad (13)$$

根据卡尔丹求根公式^[29]和式(13), 式(12)的判别式 $\Delta = \frac{b^2}{4} - 64 < 0$, 则式(12)有三个实根, 分别为:

$$\begin{cases} h_{ij1} = 4\cos\theta \\ h_{ij2} = 4\cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ h_{ij3} = 4\cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\theta = \frac{1}{3} \arccos \frac{V_{r_{ij}} - 1}{V_{r_{ij}} + 1}$, 根据实际情况, 式(12)的根 $h_{ij} \in (0, 1)$, 所以:

$$h_{ij}(V_{r_{ij}}) = 4\cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (15)$$

因为 $V_{r_{ij}}(h_{ij})$ 在 $h_{ij} \in (0, 1]$ 上为单调递减函数, 根据反函数性质可知, $h_{ij}(V_{r_{ij}})$ 在 $V_{r_{ij}} \in \left[0, \frac{5}{27}\right)$ 上为单调递减函数. 因此, 当 $V_{r_{ij}} \in \left[\frac{5}{27}, 1\right)$ 时, $h_{ij}(V_{r_{ij}}) \in (0, 1]$.

由上述证明可知, 为了符合定义 1, 使 $h_{ij} \in (0, 1]$, 在利用式(15)计算连续跳数值 h_{ij} 时, 应保证其自变量 $V_{r_{ij}} \in \left[\frac{5}{27}, 1\right)$. 由于计算 $V_{r_{ij}}$ 存在难度, 所以本文通过定义节点比来估计 $V_{r_{ij}}$.

定义 3 在节点 N_i 和其邻居节点 N_j 的 1 跳范围内, 设能与 N_i 和 N_j 都通信的节点数目为 $n_{i \cap j}$, 能与 N_i 或 N_j 通信的节点数目为 $n_{i \cup j}$, 则节点比 Nr_{ij} 为:

$$Nr_{ij} = \frac{n_{i \cap j} + 2}{n_{i \cup j}}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

如图 2 所示, $n_{i \cap j}$ 的定义中没有包含节点 N_i 和 N_j . 但是在 N_i 和 N_j 的 1 跳范围内, 能与 N_i 和 N_j 都通信的区域内的节点还应该包含节点 N_i 和 N_j . 因此能与 N_i 和 N_j 都通信的区域内的节点数目为 $n_{i \cap j} + 2$, 能与 N_i 或 N_j 通信的区域内的节点数目为 $n_{i \cup j}$. 所以使用式(16)定义的节点比 Nr_{ij} 在数值上更接近体积比 $V_{r_{ij}}$.

3.2 关系式修正

考虑到实际情况下 $V_{r_{ij}} \in \left[\frac{5}{27}, 1\right)$, 而 $Nr_{ij} \in (0, 1]$, 根据定理 1, 为了用 Nr_{ij} 代替 $V_{r_{ij}}$ 对节点间距离进行估计, 需使 $h_{ij} \in (0, 1]$. 因此, 当 $Nr_{ij} \in \left(0, \frac{5}{27}\right)$ 时, 取 $Nr_{ij} = \frac{5}{27}$. 当 $Nr_{ij} = 1$ 时, 取 Nr_{ij} 为计算机能表示的小于 1 的最大正数. 为了保证 h_{ij} 的合理性而造成的 Nr_{ij} 的截断误差会引起节点间估计距离的较大误差, 所以需要式(15)进行修正.

在满足定理 1 的条件下, 本文在式(15)的基础上由内到外逐层化简, 得出 5 种改进方案, 并引入参数 δ, K 进行修正, 如表 1 所示. 其中参数 δ, K 通过仿真求解.

为了确定 δ, K 的最佳取值, 将适当地在 δ, K 的取值范围内进行仿真. 但当参数 $K > 1$ 时, 存在 Nr_{ij} 使 $h_{ij} > 1$. 这与定义 1 中 $h_{ij} \in (0, 1]$ 矛盾. 所以在仿真实验中, 当参数 K 取值不当使 $h_{ij} > 1$ 时, 取 $h_{ij} = 1$.

无论是确定 δ, K 的最佳取值, 还是对表 1 中 5 种改进方案进行比较, 都需要一个衡量指标来评价连续跳

数值的计算关系式的改进效果. 因此定义跳数改进误差 errorhop 作为衡量指标.

表 1 关系式修正改进表

	关系式
原式	$h_{ij} = 4 \cos \left(\frac{1}{3} \arccos \frac{Nr_{ij} - 1}{Nr_{ij} + 1} - \frac{2}{3} \pi \right)$
改进 1	$h_{ij} = 4K \cos \left(\frac{1}{3} \arccos - \left(\frac{1 - Nr_{ij}}{Nr_{ij} + 1} \right)^\delta - \frac{2}{3} \pi \right)$
改进 2	$h_{ij} = 4K \cos \left(\frac{1}{3} \arccos - (1 - Nr_{ij})^\delta - \frac{2}{3} \pi \right)$
改进 3	$h_{ij} = 4K \cos \frac{\pi}{6} (Nr_{ij}^\delta + 2)$
改进 4	$h_{ij} = K(1 - Nr_{ij}^\delta)$
改进 5	$h_{ij} = K(1 - Nr_{ij})^\delta$

定义 4 跳数改进误差定义如下:

$$\text{errorhop} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n s_i} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{s_i} |h_{iik} - h'_{iik}| \quad (17)$$

其中 n 为节点数, s_i 表示节点 N_i 的邻居节点个数, h'_{iik} 表示通过关系式计算得出的 N_i 和其第 k 个邻居节点 N_{ik} 的连续跳数值, h_{iik} 表示由 N_i 和 N_{ik} 之间的实际距离得到的连续跳数值.

为了确定表 1 中的 5 种修正方案的参数, 本文将 errorhop 作为衡量指标, 使用 Matlab2017b 进行仿真实验. 仿真参数如表 2 所示. 取表 2 所列参数, K 值为 1, 从 0.4 ~ 1.6 改变参数 δ 进行仿真, 仿真结果如图 4 所示.

表 2 关系式仿真参数

仿真参数	参数取值
网络区域/m ³	100 * 100 * 100
节点总数	500
通信半径 R/m	30
循环次数	100

从图 4 各个关系式的曲线中, 取 errorhop 最低点对应的 δ 值作为表 1 中相应的 5 种改进方案的最佳参数 δ 值. 取表 2 所列参数, δ 值为表 1 中的 5 种改进方案的最佳参数 δ 值, 从 0.5 ~ 1.4 改变参数 K 进行仿真, 仿真结果如图 5 所示.

从图 5 各个关系式的曲线中, 取 errorhop 最低点对应的 K 值作为表 1 中相应的 5 种改进方案的最佳参数

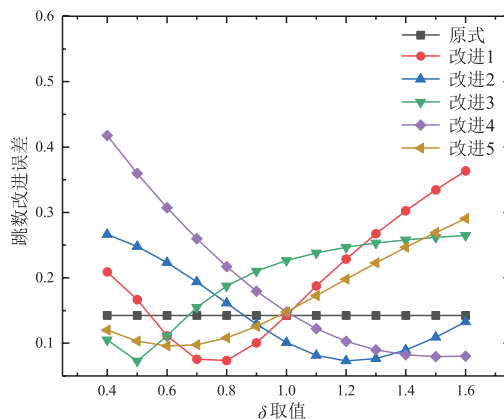


图4 参数 δ 改变对errorhop的影响

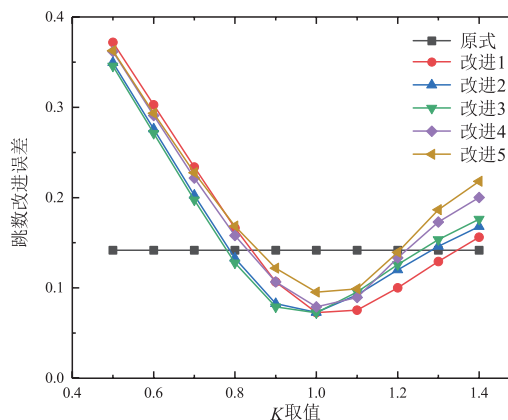


图5 参数 K 改变对errorhop的影响

K 值. 将最佳参数 δ 值和最佳参数 K 值分别代入表 1 作为关系式的修正结果, 如表 3 所示.

表 3 关系式修正结果

	关系式
原式	$h = 4 \cos \left(\frac{1}{3} \arccos \frac{Nr_{ij} - 1}{Nr_{ij} + 1} - \frac{2}{3} \pi \right)$
改进 1	$h = 4 \cos \left(\frac{1}{3} \arccos - \left(\frac{1 - Nr_{ij}}{Nr_{ij} + 1} \right)^{0.8} - \frac{2}{3} \pi \right)$
改进 2	$h = 4 \cos \left(\frac{1}{3} \arccos - (1 - Nr_{ij})^{1.2} - \frac{2}{3} \pi \right)$
改进 3	$h = 4 \cos \frac{\pi}{6} (Nr_{ij}^{0.5} + 2)$
改进 4	$h = 1 - Nr_{ij}^{1.5}$
改进 5	$h = (1 - Nr_{ij})^{0.6}$

取表 2 所列参数, 在网络区域内随机抛撒节点, 计算表 3 中 6 种关系式的跳数改进误差 errorhop, 结果如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 几种改进关系式均在原式基础上有效地降低了 errorhop. 节点数在 200 ~ 400 时,

改进 1 与改进 4 误差相近,但改进 1 在节点数为 400 ~ 1000 时效果较好,即在节点密集的情况下,改进 1 效果较好. 考虑到节点随机分布,因而选择改进 1 作为连续跳数值的计算公式.

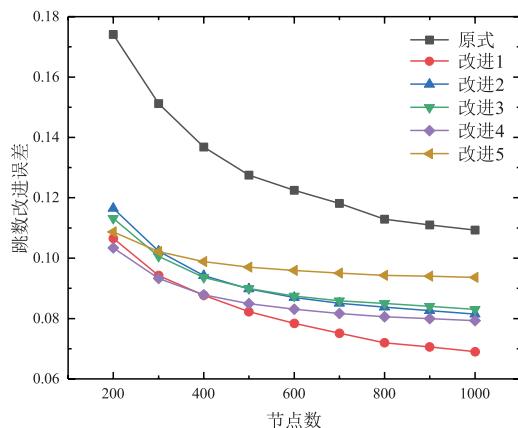


图6 节点数改变对errorhop的影响

3.3 不同环境参数下 δ 、 K 取值

由于在实际应用环境中节点比与体积比难以完全相等,本文引入参数 δ 、 K 对连续跳数值与体积比的关系式进行修正. 节点比与体积比之间差值的大小主要取决于节点分布的均匀程度和节点密度. 在本文的仿真条件下,节点分布的均匀程度和节点密度分别与通信半径 R 和节点数相关,因此本文将从这两个方面探究网络环境对 δ 与 K 的影响.

本文在网络区域、循环次数取表 2 所示参数, R 取 20m ~ 50m,节点数取 200 ~ 500,参数 δ 、 K 取 0.5 ~ 1.5 的仿真环境下进行仿真实验. 在不同节点数、通信半径下,仿真结果有极高的相似度,如图 7 所示. 由图 7 可以看出,errorhop 取最低点时,参数 δ 、 K 的取值在与 δ 和 K 相关的一条直线附近. 图 8 为不同节点数、通信半径下 errorhop 取最低点时,对 δ 和 K 的取值进行拟合分析的结果,即在直线 $K = 1.09693\delta - 0.37424$ 附近 errorhop 取

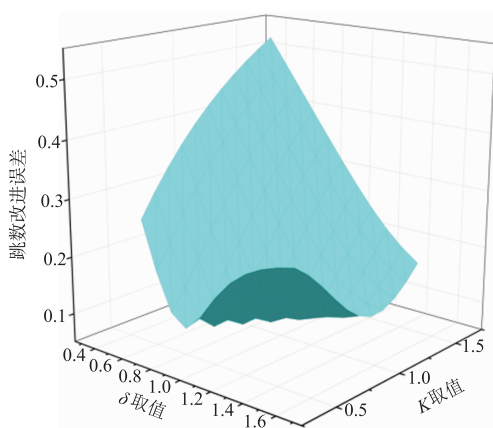


图7 不同环境参数下errorhop取值

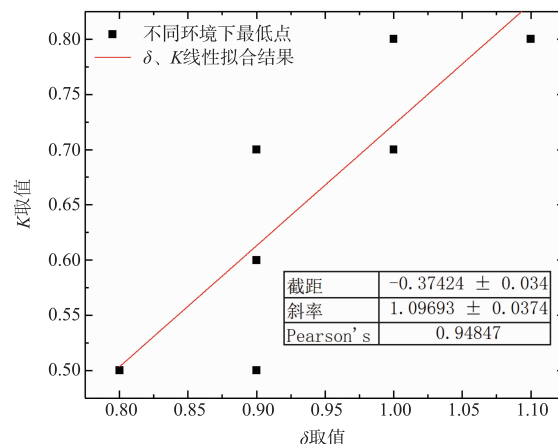


图8 errorhop最低点取值拟合结果

最低点,在这条直线上 errorhop 最多相差 0.0235. 其中当 $\delta = 0.8$ 、 $K = 0.5$ 时,errorhop 取最低点的概率为 42.8%,因此取 $\delta = 0.8$ 、 $K = 0.5$ 为最佳参数值,即跳数计算公式为:

$$h_{ij} = 2\cos\left(\frac{1}{3}\arccos - \left(\frac{1 - Nr_{ij}}{Nr_{ij} + 1}\right)^{0.8} - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (18)$$

3.4 算法步骤

步骤 1 节点在 1 跳范围内进行信息广播,每个节点记录其邻居节点的节点 ID (Identity Document),使用式(16)计算节点比,使用式(18)计算连续跳数值.

步骤 2 节点之间根据连续跳数值进行信息广播,得到多跳节点之间的跳数值.

步骤 3 根据式(1)计算跳距,广播给未知节点,根据式(2)计算未知节点与锚节点之间的距离.

步骤 4 利用未知节点与锚节点之间的距离建立方程,使用最小二乘法计算未知节点坐标.

3.5 算法复杂度分析

比较 2.1 节 DV-Hop 算法步骤和 3.2 节 VNDV-Hop 算法步骤,VNDV-Hop 算法多了 3.2 中提到的步骤 1,这一步骤时间复杂度为 $O(n^2)$,空间复杂度为 $O(n^2)$,其中 n 为网络中节点数.而 DV-Hop 算法的时间复杂度为 $O(n^3)$,空间复杂度为 $O(n^2)$.所以 VNDV-Hop 算法与 DV-Hop 算法复杂度在同一数量级上,因此二者算法复杂度相等.为了验证上述理论分析,利用 Matlab2017b 统计算法的运行时间,分析算法的复杂度.图 9 为锚节点数取 30,网络区域、通信半径取表 2 所示仿真参数时,3 种定位算法的平均运行时间.由图 9 可知,随着节点数的增长,DV-Hop 算法、VNDV-Hop 算法、基于多通信半径的加权 DV-Hop 改进算法(以下简称多通信半径算法)的运行时间呈上升趋势.本文提出的 VNDV-Hop 算法与 DV-Hop 算法的运行时间随着节点数增加在数值上与增长趋势上相近,而多通信半径算法相较于 DV-

Hop 算法在运行时间与增长趋势都有所增加. 因此, VNDV-Hop 没有增加 DV-Hop 的算法复杂度, 其运行时间与 DV-Hop 算法相近, 且优于多通信半径算法.

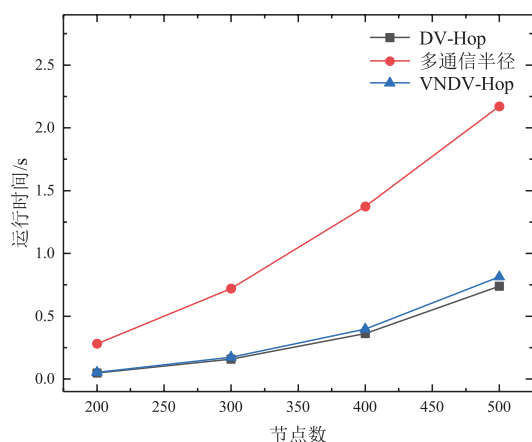


图9 算法运行时间

4 算法仿真

为了验证算法有效性, 使用 Matlab2017b 进行了仿真实验, 在 $100\text{m} \times 100\text{m} \times 100\text{m}$ 的方形区域内随机部署传感器节点, 平均定位误差采用以下公式计算:

$$\text{error} = \frac{\sum_{i=1}^{n_u} \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2 + (z_i - z'_i)^2}}{n_u \times R} \quad (19)$$

其中 (x_i, y_i, z_i) 为未知节点 N_i^u 的实际坐标, (x'_i, y'_i, z'_i) 为其估计坐标, n_u 为未知节点数, R 为节点通信半径.

本文以 error 作为衡量指标, 将 VNDV-Hop 算法、三维 DV-Hop 算法和多通信半径算法从节点数、通信半径、锚节点数三个方面进行了比较, 3 种算法对比分析如下: 图 10 为锚节点数取 30, 通信半径取 30m, 节点数从 200 ~ 500 的变化过程中 3 种算法的定位误差对比图. 仿真结果显示, 多通信半径算法与 VNDV-Hop 算法

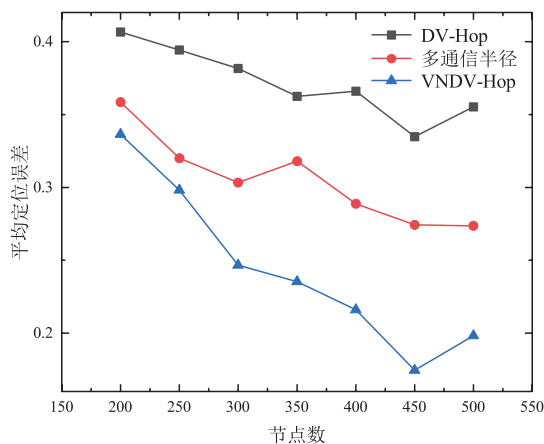


图10 节点数改变对平均定位误差的影响

的定位误差的下降趋势几乎相同. 当节点数大于 250 时, VNDV-Hop 算法的定位误差下降加快, 可以看出新算法更适用于节点密集的网络. 这是由于随着网络中节点数的增加, 邻居节点的通信范围内节点比与体积比更接近, 连续跳数值更精确. 相比三维 DV-Hop 算法, VNDV-Hop 算法的定位误差平均降低了 35%, 最高可达 47%. 相比多通信半径算法, VNDV-Hop 算法的定位误差平均降低 20%, 最高可达 36.6%. 图 11 为节点数取 500, 锚节点数取 30, 通信半径从 20m ~ 50m 的变化过程中 3 种算法的定位误差对比图. 仿真结果显示, VNDV-Hop 算法的定位误差总体低于其它两种定位算法. 当通信半径达到 40m 时, VNDV-Hop 算法的定位误差可达到 15%, 即 6m, 此时原算法的定位误差为 35%, 即 14m, 多通信半径算法的定位误差为 22%, 即 8.8m. 与三维 DV-Hop 算法相比, VNDV-Hop 算法误差平均降低了 48.7%, 最高可达 68.7%. 与多通信半径相比, VNDV-Hop 算法误差平均降低了 31%, 最高可达 43.9%. 图 12 为通信半径取 30m, 节点数取 500, 锚节点数从 20 ~ 50 的变化过程中 3 种算法的定位误差对比图. 仿真结果显示, 随着锚节点数变化, VNDV-Hop 算法的定位误差明

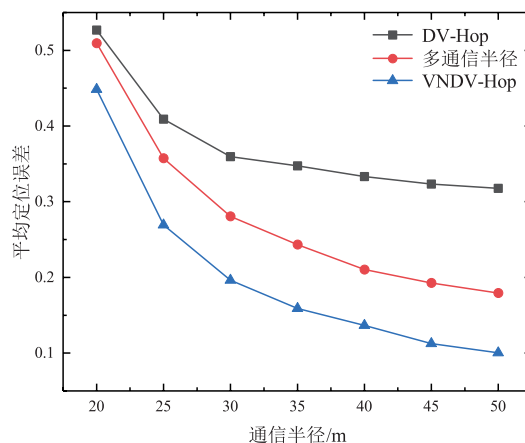


图11 通信半径改变对平均定位误差的影响

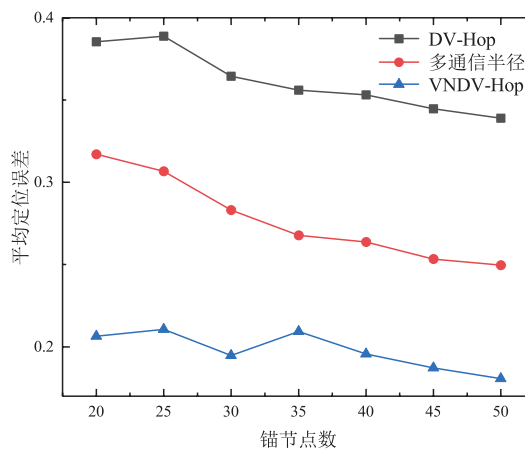


图12 锚节点数改变对平均定位误差的影响

显低于其它两种. 因为多通信半径算法的改进原理为锚节点以不同的通信半径进行广播, 进而改变锚节点的邻居节点的跳数, 所以随着锚节点数的增加, 多通信半径算法的定位误差呈稳定下降趋势. 而由于节点分布具有随机性, 所以 VNDV-Hop 算法的定位误差总体呈现下降趋势. 相比三维 DV-Hop 算法, VNDV-Hop 算法的定位误差平均降低了 45%, 最高可达 46%. 相比多通信半径定位算法, VNDV-Hop 算法的定位误差平均降低 28%, 最高可达 31%.

5 结论

本文提出了一种具有连续跳数值的 DV-Hop 改进算法(VNDV-Hop). 该算法定义并推导了连续跳数值的计算方法, 通过仿真进行参数修正, 得到了连续跳数值的最佳计算关系式. 仿真实验表明, 在节点数、通信半径、锚节点数 3 种参数条件下, VNDV-Hop 算法对比于三维 DV-Hop 算法、多通信半径算法, 在不增加算法复杂度的情况下能够有效地降低定位误差. 如何找到一种精确的跳距值的计算方法来降低节点间距离估计误差是需要进一步研究的问题.

参考文献

- [1] BELLI L, CIRANI S, DAVOLI L, et al. Applying security to a big stream cloud architecture for the internet of things [J]. *International Journal of Distributed Systems Technologies*, 2017, 7(1): 37–58.
- [2] 孙大洋, 钱志鸿, 韩梦飞, 等. 无线传感器网络中多边定位的聚类分析改进算法[J]. *电子学报*, 2014, 42(8): 1601–1607.
SUN Da-yang, QIAN Zhi-hong, Han Meng-fei, et al. Improving multilateration algorithm by cluster analysis in WSN [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(8): 1601–1607. (in Chinese)
- [3] SHAHRA E Q, SHELAMI T R, SHAKSHUKI E M. A comparative study of range-free and range-based localization protocols for wireless sensor network; using COOJA simulator[J]. *International Journal of Distributed Systems and Technologies*, 2017, 8(1): 1–16.
- [4] STANOEVI A, FILIPOSKA S, IN V, et al. Cooperative method for wireless sensor network localization [J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 40: 61–72.
- [5] 唐良瑞, 宫月, 罗艺婷, 等. 一种基于 Euclidean 的无线传感器网络三维定位算法[J]. *电子学报*, 2012, 40(4): 821–825.
TANG Liang-rui, GONG Yue, LUO Yi-ting, et al. A 3D position algorithm based on Euclidean for wireless sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4): 821–825. (in Chinese)
- [6] 刘志华, 息珍珍, 张双, 等. 基于序列相关值的蒙特卡罗优化算法[J]. *电子学报*, 2015, 43(10): 2110–2116.
LIU Zhi-hua, XI Zhen-zhen, ZHANG Shuang, et al. Sequence correlation optimized Monte Carlo localization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(10): 2110–2116. (in Chinese)
- [7] 刘伟, 董恩清, 宋洋. 无线传感器网络节点三维定位的翻转模糊检测[J]. *电子学报*, 2016, 44(2): 374–384.
LIU Wei, DONG En-qing, SONG Yang. Flip ambiguity detection for three-dimensional node localization in wireless sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(2): 374–384. (in Chinese)
- [8] CUI L, XU C, LI G, et al. A high accurate localization algorithm with DV-Hop and differential evolution for wireless sensor network[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 68: 39–52.
- [9] 邴晓瑛, 徐保国. 基于多通信半径的加权 DV-Hop 改进算法[J]. *计算机应用与软件*, 2016, 33(7): 125–128.
BING Xiao-ying, XU Bao-guo. Improved DV-Hop algorithm with weighting based on multiple communication radius [J]. *Computer Applications and Software*, 2016, 33(7): 125–128. (in Chinese)
- [10] KUMAR S, LOBIYAL D K. Power efficient range-free localization algorithm for wireless sensor networks [J]. *Wireless Networks*, 2013, 20(4): 681–694.
- [11] SHI Q, WANG D, XU Q, et al. An improved DV-Hop scheme based on similar path searching and Quasi-Newton iterative algorithm [A]. *The 30th Chinese Control and Decision Conference (2018 CCDC)* [C]. Shenyang: IEEE, 2018. 6769–6774.
- [12] YANG X, ZHANG W. An improved DV-Hop localization algorithm based on bat algorithm [J]. *Cybernetics and Information Technologies*, 2016, 16(1): 89–98.
- [13] 尼迎波, 陈元琰, 叶娟, 等. 基于多通信半径加余弦定理的 DV-Hop 算法的改进[J]. *计算机科学*, 2018, 45(11): 320–324.
NI Ying-bo, CHEN Yuan-yan, YE Juan, et al. Improvement of DV-Hop algorithm based on multiple communication Radii and Cosine theorem [J]. *Computer Science*, 2018, 45(11): 320–324. (in Chinese)
- [14] SHI Q, XU Q, ZHANG J. An improved DV-Hop scheme based on path matching and particle swarm optimization algorithm [J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 104(4): 1301–1320.
- [15] SHIKAI S, BIN Y, KAIGUO Q, 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.
- [16] KEQIANG R, LANG D. Improved DV-Hop algorithm

- based on global hop count optimization and hop distance error correction [J]. Chinese Journal of Sensors Actuators, 2019, 32(3): 438 – 443.
- [17] YE HAI C, RIRONG Z, LIANG X, et al. Improved localization algorithm of multiple communication radius DV-Hop based on evolutionary algorithm [J]. Computer Engineering Applications, 2019, 55(1): 89 – 95.
- [18] CAI X, WANG P, DU L, et al. Multi-Objective three-dimensional DV-Hop localization algorithm with NSGA-II [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(21): 10003 – 10015.
- [19] CHEIKHROUHO O, G M B, ALROOBAEA R. A hybrid DV-Hop algorithm using RSSI for localization in large-scale wireless sensor networks [J]. Sensors (Basel), 2018, 18(5): 1469 – 1483.
- [20] HAN D, YU Y, LI K C, et al. Enhancing the sensor node localization algorithm based on improved DV-Hop and DE algorithms in wireless sensor networks [J]. Sensors (Basel), 2020, 20(2): 343 – 367.
- [21] MESSOUS S, LIOUANE H, LIOUANE N. Improvement of DV-Hop localization algorithm for randomly deployed wireless sensor networks [J]. Telecommunication Systems, 2019, 73(15): 75 – 86.
- [22] YU X, HU M. Hop-Count quantization ranging and hybrid cuckoo search optimized for DV-HOP in WSNs [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 108(4): 2031 – 2046.
- [23] LI D, WEN X B. An improved PSO algorithm for distributed localization in wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(7): 1 – 8.
- [24] GU M. An improvement of localization algorithm based on particle swarm optimization and simulated annealing in wireless sensor networks [J]. Journal of Information and Computational Science, 2013, 10(5): 1497 – 1505.
- [25] 熊欢, 毛永毅. 基于跳数修正和改进粒子群优化 DV-Hop 定位算法 [J]. 现代电子技术, 2018, 41(18): 76 – 79.
- XIONG Huan, MAO Yong-yi. DV-Hop positioning algorithm based on hop count correction and improved particle swarm optimization [J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(18): 76 – 79. (in Chinese)
- [26] LIU Y, CHEN J, XU Z. Improved DV-Hop localization algorithm based on bat algorithm in wireless sensor networks [J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2016, 11(1): 215 – 234.
- [27] WANG Y, WANG P, ZHANG J, et al. A novel DV-Hop method based on coupling algorithm used for wireless sensor network localisation [J]. International Journal of Wireless Mobile Computing, 2019, 16(2): 128 – 137.
- [28] PAJEVIC S. Performance analysis of communications networks and systems [J]. Journal of Statistical Physics, 2007, 126(3): 725 – 727.
- [29] 乔慧, 李剑锋, 陈兴, 等. 二齿差摆动活齿传动齿廓方程及几何性质分析 [J]. 机械设计与制造, 2012(11): 40 – 42.
- QIAO Hui, LI Jian-feng, CHEN Xing, et al. The equations of tooth profile and geometry analysis of two-tooth difference swing movable tooth transmission [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(11): 40 – 42. (in Chinese)

作者简介



程 杰 男, 1995 年 4 月生, 山西忻州人。现为河北师范大学硕士研究生。主要从事无线传感器网络移动定位算法的设计工作。
E-mail: jcheng0415@163.com



董云玲 女, 1994 年 6 月生, 河北石家庄人。现为河北师范大学硕士研究生。主要从事无线传感器网络移动定位算法的设计工作。
E-mail: yldong1095@163.com



陈嘉兴 男, 1977 年 1 月生, 天津人。博士, 石家庄科技工程职业学院教授。主要从事无线传感器网络移动节点定位、扩频通信技术等方面的研究。
E-mail: xinghuo2815@163.com



刘志华 (通信作者) 女, 1977 年 4 月生, 河北沧州人。河北师范大学教授。研究方向为无线传感器网络移动定位、目标跟踪技术。
E-mail: hebtuliuzhihua@163.com