

无线传感器网络中基于接近度的 无需测距定位算法

孟颖辉, 闻英友, 陈 剑, 赵 宏
(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 针对当前无需测距定位算法存在定位误差大的问题, 本文提出了一种基于接近度的无需测距定位算法, 接近度是本文定义的一个用来表示邻居节点距离远近的值. 首先根据邻居节点之间的几何特征和邻居关系推导出一个线性函数, 函数输出是接近度. 然后用锚节点之间的距离和接近度计算一个矫正值, 矫正值和邻居节点之间接近度的乘积作为邻居节点之间的估计距离. 最后根据估计距离计算未知节点的估计位置. 仿真结果表明, 本文算法的估计距离误差和定位误差都要低于当前同类型定位算法.

关键词: 无需测距; 接近度; 邻居关系; 锚节点; 矫正值

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)09-1712-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.09.008

Range-Free Localization Algorithm Based on Proximity for Wireless Sensor Networks

MENG Ying-hui, WEN Ying-you, CHEN Jian, ZHAO Hong

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Many existing range-free localization methods encounter large localization error. To address this problem, this paper proposes a range-free localization algorithm based on proximity. Proximity is used to denote the distance relation between neighbor nodes. First, a linear function is designed based on the geometric features and neighbor relation. The output is the value of proximity. Then a correction value is generated by the distances of anchors and proximity of neighbor nodes. The product of the correction value and proximity between neighbor nodes is the estimation distance. Finally, the estimated positions of non-anchor nodes are calculated based on the estimated distances. The simulation results show the proposed algorithm achieves better results than the current algorithms in both distance estimation error and localization error.

Key words: range-free; proximity; neighbor relation; anchor nodes; correction value

1 引言

无线传感器网络(WSN)是当今信息领域的研究热点, 主要用来监测网络部署区域各种环境特性^[1]. 节点发回所处位置的信息数据, 这些数据必须和位置信息捆绑才有意义^[2~4]. 在网络层, 位置信息与传输距离的结合使得基于地理位置的路由算法成为了可能^[5,6]. 虽然节点可以通过装配 GPS 获得自身的精确位置, 然而由于 GPS 能耗大、成本高, 使得它不适合大型的低成本 WSN^[7,8]. 因此, 节点定位技术是 WSN 关键技术之一.

WSN 一般包含两种节点: 一种是知道自身位置的

节点, 称为锚节点; 另一种是需要通过计算获得位置的节点, 称为未知节点. 节点定位算法可以分成基于测距(range-based)算法和无需测距(range-free)算法^[9]. range-based 算法需要使用 RSSI^[10]、TOA^[11]、TDOA^[12]和 AOA^[13]等测量技术获得邻居节点之间的距离或角度信息. range-free 算法使用节点之间的邻居关系和几何特征计算未知节点的估计位置. range-based 算法受测距技术的限制, 需要给节点添加一些硬件. 一方面增加了网络的成本; 另一方面测距技术受环境因素影响较大. range-free 算法只需要节点之间的邻居关系, 不需要附加的硬件, 受环境因素较小, 适用于大型的低成本 WSN.

为了解决当前 range-free 算法存在定位误差大的问题,本文提出了一种基于接近度的无需测距定位算法,简称 PNN-MAP 定位算法.算法定义了一个新的表示邻居节点距离远近的计量单位,称之为接近度,用 PNN (Proximity of Neighbor Nodes)表示.首先利用节点的邻居关系和几何特征计算接近度 PNN.然后设计了一个基于 PNN 的距离估计方法.最后根据估计距离和 MDS-MAP^[14]计算未知节点的估计位置.仿真结果 PNN-MAP 算法的估计距离误差和定位误差都要低于当前同类型定位算法.

2 相关工作

到目前为止,学术界提出了许多 range-free 算法.文献[15]提出了 DV-HOP 算法,通过距离矢量路由算法获得节点之间的最小跳数,然后用锚节点信息和最小跳数估计节点之间距离.获得未知节点和 3 个以上锚节点之间的估计距离后,用最大似然估计法估算未知节点的位置.由于 DV-HOP 在估算节点之间距离时,节点之间的距离都用一跳表示,而不管节点距离远近,从而造成了很大的估计距离误差和定位误差.文献[16]提出了 LEAP 算法,假设网络中的未知节点服从泊松分布,用节点分布密度、通信半径等网络参数计算单跳矫正值. LEAP 用网络参数来计算单挑矫正值,在满足文中网络部署条件的情况下,同 DV-HOP 相比能够提高定位精度.然而现实当中节点分布不可能都满足泊松分布,而且 LEAP 需要锚节点有规律分布,因此实用性不强.文献[17]提出了 RSD 算法,利用邻居节点信号强度的大小排序建立了一个函数,函数的输出结果就是节点之间的估计距离. RSD 中需要邻居节点之间的 RSSI(信号强度值),然而 RSSI 受环境因素影响较大导致算法扩展性较差.文献[18]提出了 DV-RND 算法,用一个参数 RND 来表示两个邻居节点之间的远近关系,再通过计算一个 RND 矫正值来获得未知节点和锚节点之间的估计距离,最后用最大似然估计法计算未知节点的估计位置.然而文中 RND 的表达不够准确,而且需要把锚节点放到区域的角落位置影响了算法的通用性.

通过对以往 range-free 算法分析可以看到,计算过程可以分成两步:(1)估计节点之间的距离;(2)获得节点之间的距离之后,用最大似然估计法计算未知节点的位置.为了获得更精确的定位结果,本文设计了一个新的距离估计算法,获得任意两个节点之间的估计距离之后,用 MDS-MAP 替代最大似然估计来计算未知节点的估计位置,最终形成了本文的定位算法,简称 PNN-MAP 算法.仿真结果证明了 PNN-MAP 算法的有效性,而且仿真环境中,所有节点都随机分布,因此算法具有较好的实用性.

3 PNN-MAP 定位算法

假设总共有 n 个节点,其中 k 个节点是锚节点.不失一般性,假设网络中所有节点具有相同的通信半径 r .节点通过转发消息获得自身邻居节点信息,邻居关系模型为:

$$M_i = \{j | j \neq i \& d_{ij} \leq r\} \quad (1)$$

i 和 j 表示任意两个节点, d_{ij} 表示节点之间的欧氏距离, M_i 表示节点 i 的邻居节点集合.首先介绍接近度 PNN 的推导过程.

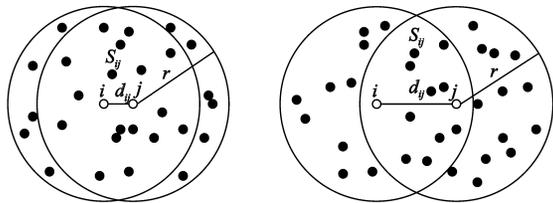


图1 邻居节点通信范围

3.1 PNN 推导过程

节点的通信范围可以看成是以节点为圆心,半径为 r 的圆.图 1 是邻居节点 i 和 j 通信范围图. d_{ij} 是 i 和 j 之间的距离, S_{ij} 表示 i 和 j 通信范围重叠区域,黑色实心点表示 i 和 j 的其它邻居节点.从图 1 中可以看到, S_{ij} 的面积和 d_{ij} 成反比.通过几何图形的计算得到 S_{ij} 的面积 $A(S_{ij})$ 为:

$$A(S_{ij}) = 2r^2 \arccos\left(\frac{d_{ij}}{2r}\right) - d_{ij} \sqrt{r^2 - \frac{d_{ij}^2}{4}} \quad (2)$$

$A(S_{ij})$ 和节点的通信范围面积的比值为:

$$\frac{A(S_{ij})}{\pi r^2} = \frac{2}{\pi} \arccos\left(\frac{d_{ij}}{2r}\right) - \frac{d_{ij}}{\pi r} \sqrt{1 - \left(\frac{d_{ij}}{2r}\right)^2} \quad (3)$$

假设式(3)中 $y = A(S_{ij})/(\pi r^2)$, $x = d_{ij}/(2r)$,可以得到:

$$y = \frac{2}{\pi} \arccos(x) - \frac{2}{\pi} x \sqrt{1 - x^2} \quad (4)$$

将式(4)中的 $\arccos(x)$ 和 $x \sqrt{1 - x^2}$ 用泰勒级数展开得到:

$$\begin{aligned} \arccos(x) &= \frac{\pi}{2} - x - \frac{1}{6}x^3 - \frac{3}{40}x^5 - \dots \\ x \sqrt{1 - x^2} &= x - \frac{x^3}{2} - \frac{1}{8}x^5 - \dots \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),并将 x 和 y 替换掉得到:

$$\frac{A(S_{ij})}{\pi r^2} = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{d_{ij}}{r}\right) + \frac{1}{12\pi} \left(\frac{d_{ij}}{r}\right)^3 + \frac{1}{320\pi} \left(\frac{d_{ij}}{r}\right)^5 + \dots \quad (6)$$

由于是邻居节点, d_{ij}/r 取值范围是 $[0, 1]$, 因此 $(d_{ij}/r)^3/(12\pi)$ 及其后面的值很小,如果忽略,则两者近似成线性关系.我们取值 $d_{ij}/r = 0:0.02:1$,代入式(3),

得到图 2.

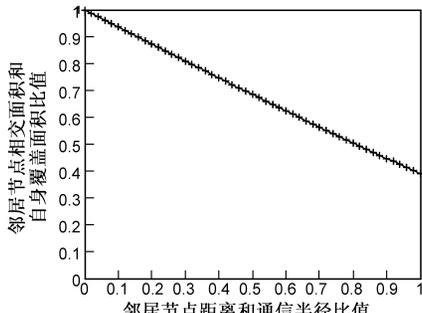


图2 距离比值对应的面积比值

图 2 进一步验证了线性关系. 取图 2 中的两个极限位置, 当 d_{ij}/r 为 0 时, 面积比值为 1; d_{ij}/r 为 1 时, 面积比值为 0.391. 最终可以得到一个线性关系式:

$$\frac{d_{ij}}{r} = \frac{1}{0.609} \left(1 - \frac{A(S_{ij})}{\pi r^2} \right) \quad (7)$$

$A(S_{ij})$ 是一个未知数, 然而对于 WSN, 尤其是不用任何测量技术的低成本网络, 节点的部署密度比较高. 节点通信范围内面积的大小和邻居节点个数可以认为是成正比关系, 因此面积比值近似为:

$$\frac{A(S_{ij})}{\pi r^2} \approx \sigma \cdot \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (8)$$

式(8)中的 N_{ij} 表示 S_{ij} 区域内节点个数, $N_{ij} = |M_i \cap M_j| + 2$, 其中 $|M_i \cap M_j|$ 表示 i 和 j 的相同邻居节点个数. N_i 是 i 通信区域内节点个数, $N_i = |M_i| + 1$, 其中 $|M_i|$ 表示 i 的邻居节点个数, σ 是一个修正参数. 将式(8)和式(7)结合得到:

$$\text{PNN}_{ij} = \frac{d_{ij}}{r} = \frac{1}{0.609} \left(1 - \sigma \cdot \frac{N_{ij}}{N_i} \right) \quad (9)$$

PNN_{ij} 就是本文的接近度. 由于节点随机分布, 所以 N_i 和 N_j 不一定相等, 从而导致 PNN_{ij} 和 PNN_{ji} 也不一定相等. 一个节点的邻居节点越多, 式(8)中左边和右边的值越接近, 得到的估计值越准确, 因此 PNN_{ij} 采用计算方法为:

$$\text{PNN}_{ij} = \text{PNN}_{ji} = \frac{d_{ij}}{r} = \frac{1}{0.609} \left(1 - \sigma \cdot \frac{N_{ij}}{\max(N_i, N_j)} \right) \quad (10)$$

$\max(N_i, N_j)$ 表示取两者的最大值. 从式(10)中可以看到, PNN_{ij} 可以区分两个邻居节点的距离远近关系. 当两个邻居节点距离近时, N_{ij} 值大, PNN_{ij} 值小; 距离远时, N_{ij} 值小, PNN_{ij} 值大.

3.2 PNN-MAP 定位算法

本节介绍基于 PNN 的 PNN-MAP 算法. 首先给出基于 PNN 距离估计方法. 从式(10)中, 可以得到 i 和 j 之间距离估计值 \bar{d}_{ij} 为:

$$\bar{d}_{ij} = \bar{d}_{ji} = r * \text{PNN}_{ij} \quad (11)$$

然而, 由于节点随机分布, 式(8)存在误差, 所以 PNN_{ij} 存在误差, 最终导致 \bar{d}_{ij} 存在误差. 为了进一步减小估计距离误差, 通过锚节点之间的真实距离和最短接近度路径计算一个接近度矫正值 α_{PNN} . α_{PNN} 和 PNN_{ij} 乘积为最终估计距离. 根据节点之间的估计距离和 MDS-MAP 算法^[14] 可以计算未知节点的估计位置. PNN-MAP 算法的具体步骤如算法 1 所示.

算法 1 PNN-MAP 定位算法

①根据式(10)计算邻居节点之间 PNN 值.

②根据①中计算的 PNN, 通过 Floyd-Warshall 最短路径算法计算任意两个非邻居节点之间最短 PNN 路径值, 当然也包含锚节点之间的最短 PNN 路径值, 用 minPNN 表示.

③得到锚节点之间的最短 PNN 路径值后, 用式(12)计算 α_{PNN} :

$$\alpha_{\text{PNN}} = \frac{\sum_{p \neq q, p, q \in A} d_{pq}}{\sum_{p \neq q, p, q \in A} \min \text{PNN}_{pq}} \quad (12)$$

$$d_{pq} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 - (y_p - y_q)^2}$$

式(12)中的 A 表示锚节点集合, d_{pq} 表示锚节点 p 和 q 之间的欧氏距离, (x_p, y_p) 和 (x_q, y_q) 表示锚节点 p 和 q 的真实坐标.

④邻居节点之间的估计距离 \bar{d}_{ij} 为:

$$\bar{d}_{ij} = \alpha_{\text{PNN}} * \text{PNN}_{ij} \quad (13)$$

⑤根据④中计算的 \bar{d}_{ij} 和 MDS-MAP 算法计算所有未知节点的估计坐标.

从算法 1 中可以看到, ①~④是距离估算, ⑤是根据估计距离计算未知节点估计位置, 其中 MDS-MAP 算法在文献[14]有详细描述. 算法 1 即可以是分布式的, 也可以是集中式的. 如果是集中式的, 节点将邻居节点信息发送到计算中心, 然后执行算法 1. 如果是分布式的, 节点自身执行算法 1, 其中②中的 Floyd-Warshall 和⑤中的 MDS-MAP 算法用对应的分布式版本即可. 本文考虑节点的计算能力有限, 采用集中式算法, 时间复杂度是 $O(n^3)$.

4 仿真测试

为了测试 PNN-MAP 算法的有效性, 用 MATLAB 进行了仿真测试. 测试的 WSN 是在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 区域随机产生 200 个节点, 节点通过自组网构成一个 WSN, 节点不需要任何的硬件和场强信息, 只需要网络连通. 本文测试了不同锚节点个数和通信半径对算法性能的影响. 为了使实验结果更具代表性, 随机产生 10 组网络, 测试结果是 10 组网络的平均值. 式(10)中的 σ 经过大

量测试后,取值为 0.9 时能够减小误差,因此,算法 1 中 $\sigma = 0.9$. 在测试本文算法性能时,同下面算法进行对比:文献[17]中的 DV-HOP,文献[18]中的 LEAP 和文献[20]中的 DV-RND.

4.1 性能指标

本节定义算法的两项性能:(1)估计距离误差;(2)定位误差.估计距离的精确性直接影响定位结果,估计距离误差计算方法为:

$$\text{disError} = \frac{1}{r \sum_{i=1}^n |M_i|} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in M_i} |d_{ij} - \bar{d}_{ij}| \times 100\% \quad (14)$$

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

其中 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 表示 i 和 j 的真实坐标; d_{ij} 表示 i 和 j 之间的真实距离; \bar{d}_{ij} 表示 i 和 j 之间的估计距离; $|M_i|$ 表示节点 i 的邻居节点个数. 本文距离的计算方法是算法 1 中的 ① ~ ④. DV-HOP、LEAP 和 DV-RND 的距离估计方法在对应的文献中有详细描述. 获得节点之间的估计距离之后, DV-HOP、LEAP 和 DV-RND 用最大似然估计法计算未知节点估计位置,而本文用的是 MDS-MAP 算法计算未知节点位置. 定位误差的采用的计算方法为:

$$\text{localError} = \frac{1}{(n - k)r} \sum_{i=1}^{n-k} \sqrt{(x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2} \times 100\% \quad (15)$$

其中, (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 表示未知节点的估计坐标, k 是锚节点个数.

4.2 通信半径对算法性能的影响

对于节点来说,通信半径决定了节点的通信范围,通信半径越大,邻居节点的个数越多. 本节测试锚节点个数为 20,图 3 是通信半径对估计距离误差的影响,这里通信半径变化范围是 13m ~ 30m,当通信半径小于 13m 时,随机生成的网络有时候是不连通的,本文不作考虑.

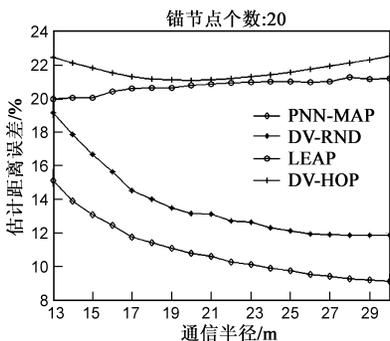


图3 通信半径对估计距离误差的影响

从图 3 中可以看到,随着通信半径的增大, DV-HOP

和 LEAP 的估计距离误差变化幅度很小. DV-HOP 的估计距离误差变化范围是 20% ~ 21.3%, LEAP 的变化范围是 21% ~ 22.5%. DV-RND 和 PNN-MAP 的估计距离误差随着通信半径的增大而减小,变化趋势很明显. 而且不管通信半径是多大, DV-RND 和 PNN-MAP 的估计距离误差都要小与 DV-HOP 和 LEAP, 而 PNN-MAP 的估计距离误差又明显小与 DV-RND, 从而证明基于 PNN 估计距离方法的有效性. 前面测试了通信半径对估计距离误差的影响,下面测试对定位误差的影响,图 4 是实验结果.

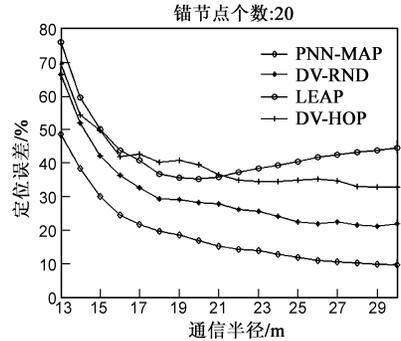


图4 通信半径对定位误差的影响

从图 4 中可以看到, DV-HOP、DV-RND 和 PNN-MAP 的定位误差随着通信半径的增加而减小. 在通信半径小于 20m 时, LEAP 的定位误差随着通信半径的增加而减小, 当通信半径大于 20m 时, LEAP 的定位误差随着通信半径的增加而增加. 总之, 当锚节点个数固定, 不管通信半径是多少, PNN-MAP 的定位误差都要小于其它三种算法. 我们取图 4 中每条曲线上 18 个点对应的定位误差平均值, PNN-MAP 的平均定位误差为 18.97%, 比 DV-RND 降低了 11.78%, 比 LEAP 降低了 24.74%, 比 DV-HOP 降低了 21.29%, 可以看到 PNN-MAP 的定位误差明显降低, 证明了本文算法的有效性.

4.3 锚节点个数对算法性能的影响

本节测试锚节点个数对估计距离误差和定位误差的影响,通信半径设置为 25m,锚节点个数的变化范围是 3 到 20. 图 5 是锚节点个数对估计距离误差影响的测试结果.

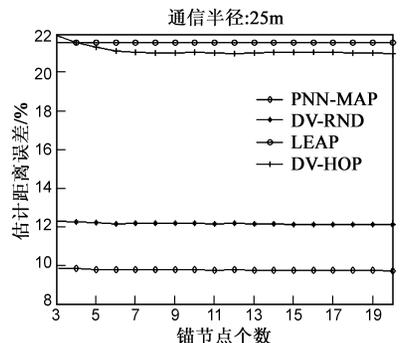


图5 锚节点个数对估计距离误差的影响

从图中可以看到,在通信半径确定的情况下,锚节点个数的改变对 PNN-MAP, DV-RND 和 DV-HOP 的估计距离误差影响很小,而对 LEAP 是没有任何影响.这是因为当通信半径确定的时候,节点之间的邻居关系,邻居节点个数也确定. LEAP 在估计距离时,如果节点总个数确定,单跳矫正值只和通信半径有关,因此当通信半径不变, LEAP 的估计距离误差是一个恒定值. DV-HOP、DV-RND 和 PNN-MAP 中的矫正值都用锚节点之间的距离进行了矫正,因此当锚节点变化的时候,对应的估计距离误差也会发生变化,但是这种变化非常小.图 5 显示,当通信半径大小确定,不管锚节点个数是多少, PNN-MAP 中的估计距离方法要优于其它三种算法.图 6 是锚节点个数对定位误差的影响.

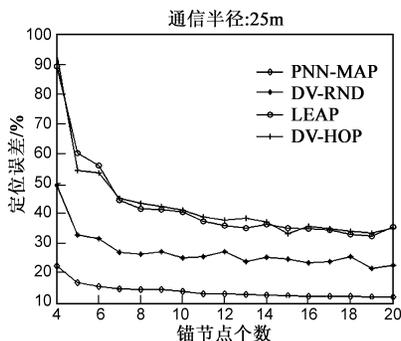


图6 锚节点个数对定位误差的影响

从图 6 中可以看到,四种算法的定位误差总体上是随着锚节点个数的增加而减小.这里需要注意图中锚节点的个数变化范围是 4~20.这是因为当锚节点个数为 3 个的时候, PNN-MAP 的定位误差为 57.22%, DV-RND 为 191.89%, LEAP 为 391.56%, DV-HOP 为 418.71%.可以看到除了 PNN-MAP 外,其余三种算法的定位误差非常大,不易在图中显示.总之,无论锚节点的个数为多少, PNN-MAP 的定位误差明显小于其它三种算法.我们取图 4 中每条曲线上 17 个点对应的定位误差平均值, PNN-MAP 的平均定位误差为 13.91%,比 DV-RND 降低了 13.26%,比 LEAP 降低了 28.62%,比 DV-HOP 降低了 29.11%,证明了本文算法的有效性.

5 结论

本文提出了一种基于接近度的无需测距 WSN 定位算法.首先用节点邻居节点个数计算出两个邻居节点之间的接近度,用 PNN 表示.为了减小估计距离误差,利用锚节点之间的距离和最小 PNN 路径值计算一个 PNN 矫正值, PNN 矫正值和邻居节点之间的 PNN 值的乘积就是邻居节点之间的估计距离.获得邻居节点之间的估计距离之后,用 MDS-MAP 计算未知节点的估计位置.最后本文测试了通信半径和锚节点个数的改

变对算法估计距离误差和定位误差的影响,同时与 DV-HOP、LEAP 和 DV-RND 算法进行了对比.实验结果显示,不管通信半径和锚节点个数是多少, PNN-MAP 的估计距离误差和定位误差都要低于其它三种算法,证明了本文算法的有效性.而本文算法的测试环境对节点没有任何附件硬件的要求,并且所有节点都是随机分布,只需要网络能够连通即可,因此具有较强的实用性和通用性.

参考文献

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292 - 2330.
- [2] 沙超,王汝传,孙力娟,黄海平. WSN 中一种信标节点可迁移的协作定位方法[J]. *电子学报*, 2010, 38(11): 2625 - 2629.
- Shao Chao, Wang Ru-chuan, Sun Li-juan, Huang Hai-jing. A cooperating localization method based on beacon transfer in wireless sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(11): 2625 - 2629. (in Chinese)
- [3] Vempaty A, Ozdemir O, Agrawal K, Chen H, Varshney PK. Localization in wireless sensor networks: Byzantines and mitigation techniques [J]. *IEEE Journal and Magazines*, 2013, 61(6): 1495 - 1508.
- [4] 唐良瑞,官月,罗艺婷,柯珊珊. 一种基于 Euclidean 的 WSN 三维定位算法[J]. *电子学报*, 2012, 40(4): 821 - 825.
- Tang Liang-ru, Gong Yue, Luo Yi-ting, Ke Shan-shan. A 3D position algorithm based on euclidean for wireless sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4): 821 - 825. (in Chinese)
- [5] Redondi A, Chirico M, Borsani L. An integrated system based on wireless sensor networks of patient monitoring, localization and tracking [J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(1): 39 - 53.
- [6] Shi Q, Comaniciu C, Wang DD, Trueli U. Cross-layer MAC design for location-aware wireless sensor networks [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2011, 24(7): 872 - 888.
- [7] 李东岳,王英龙,魏诺,刘颖慧. 信号强度和运动向量结合的 WSN 移动节点定位 [J]. *电子学报*, 2010, 38(2A): 221 - 224.
- Li Dong-yue, Wang Ying-long, Wei Nuo, Liu Ying-hui. Localization algorithm for mobile nodes in wireless sensor networks based on single strength and motion vector [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(2A): 221 - 224. (in Chinese)
- [8] Velimirovic AS, Djordjevic GL, Velimirovic MM, Jovanovic MD. Fuzzy ring-overlapping range-free (FRORF) localization method for wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2012, 35(13): 1590 - 1600.
- [9] Li Baozhu, Wang Hui. A low complexity localization algorithm

- in wireless sensor network[A]. Proceedings of CICC-ITOE International Conference on Innovative Computing and Communication on[C]. USA: IEEE, 2010. 217 – 220.
- [10] Moravek P, Komosny D, Simek M, Gribau D, Lazaro A. Energy analysis of received signal strength localization in wireless sensor networks[J]. Radioengineering, 2011, 20(4): 937 – 945.
- [11] Yu K, Guo YJ, Hedley M. TOA-based distributed localization with unknown internal delays and clock frequency offsets in wireless sensor networks[J]. IET Signal Processing, 2009, 3(2): 106 – 118.
- [12] Yang L, Ho KC. An approximately efficient TDOA localization algorithm in closed-form for locating multiple disjoint sources with erroneous sensor positions[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(12): 4598 – 4615.
- [13] Lee YS, Park JW, Barolli L. A localization algorithm based on AOA for ad-hoc sensor networks [J]. Mobile Information Systems, 2012, 8(1): 61 – 72.
- [14] Shang Y, Wheeler R, Zhang Y. Localization from mere connectivity[A]. Proceedings of the Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing[C]. Annapolis(USA): ACM, 2003. 201 – 212.
- [15] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS)[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'01)[C]. San Antonio, USA: IEEE, 2001. 2926 – 2931.
- [16] Wang Y, Wang XD, Wang DM, Dharma P. Range-free localization using expected hop progress in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2009, 20(10): 1540 – 1552.
- [17] Zhong ZG, He T. RSD: A metric for achieving range-free localization beyond connectivity[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2011, 22(10): 1943 – 1951.
- [18] Wu G, Wang S, Wang B, Dong Y, Yan S. A novel range-free localization based on regulated neighborhood distance for wireless ad hoc and sensor networks[J]. Computer Networks, 2012, 56(16): 3581 – 3593.

作者简介



孟颖辉 男, 1984 年出生于河南郑州, 东北大学博士研究生, 主要从事无线传感器网络关键技术、网络安全等方面的研究工作。

E-mail: yinghuimeng@126.com



闻英友 男, 1974 年出生于辽宁沈阳, 东北大学副教授, 主要研究传感器网络、移动通信、网络与信息安全等。

E-mail: wenyi@neusoft.com