

DOI: 10.7652/xjtuxb201406001

改进的无线传感器网络无偏距离估计 与节点定位算法

魏全瑞, 刘俊, 韩九强

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对无线传感器网络中基于跳数的节点定位算法不能满足无偏距离估计、节点定位误差大的问题,提出了一种改进的无偏距离估计与节点定位算法(UEDV-hop, Unbiased Estimation DV-hop)。该算法分析期望距离和跳数的关系,建立一种新的期望距离与跳数模型,根据节点通信半径是否已知分别推导了两种 UEDV-hop 的求解形式。仿真实验结果表明:所提的两种 UEDV-hop 算法的估计距离在不同跳数时都近似等于该跳期望距离,算法在距离估计和节点定位精度上相对于 DV-hop(Distance Vector-hop)算法及基于最小二乘法改进的 DV-hop 算法都有较大提高,在节点数目等于 2 500 时,UEDV-hop 算法的估计距离误差比 DV-hop 算法降低了 9.5%,定位精度提高了 55%。

关键词: 无线传感器网络;距离估计;节点定位

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0001-06

An Improved DV-hop Node Localization Algorithm Based on Unbiased Estimation for Wireless Sensor Networks

WEI Quanrui, LIU Jun, HAN Jiuqiang

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An improved DV-hop localization algorithm based on unbiased estimation is proposed to obtain the unbiased estimation of distance and to reduce the localization error of existing node localization methods based on hop-count for wireless sensor networks. A modified model of the relationship between expected distance and hop count is established through analyzing the hop progress information for different hop counts; Two approaches for the solution of UEDV-hop method are derived, according to whether node communication radiuses are known. Simulation results and comparisons with the DV-hop and the DV-hop (LS) algorithms show that the distance estimated by the UEDV-hop is approximately equal to the expectation distance, and that the estimation error and the localization accuracy of the UEDV-hop are improved significantly. A comparison to the DV-hop with 2 500 nodes shows that the distance estimation error of the UEDV-hop is reduced by 9.5%, and the localization accuracy is improved by 55%.

Keywords: wireless sensor network; distance estimation; node localization

无线传感器网络节点定位算法是一个重要的支撑技术^[1-5]。通常用户不仅需要知道发生了什么,还

需要知道事件发生的地点或目标所处的位置。节点定位算法允许网络中每个节点获取自身的位置信

息,位置信息可以是节点的绝对坐标或相对坐标。定位算法必须满足低成本、高效能、高定位精度的要求,受节点资源限制,现有的无线传感器网络中的节点定位问题仍未得到圆满解决。基于跳数的距离估计算法仅需要节点间的跳数信息,成本低、适用范围广,逐渐受到广泛关注。

现有基于跳数的节点定位算法可分为两类^[6]:启发式算法,例如 DV-hop(Distance Vector-hop)算法^[7-8];数学分析类算法,例如基于期望每跳前进距离的无需测距节点定位算法 LAEP(A Novel Range-Free Localization Algorithm Using Expected Hop Progress)算法^[9-10]。数学分析类算法通过节点分布模型、节点通信模型,推导出节点平均每跳距离,此类算法的缺点在于,需要知道节点通信半径、具体的节点分布模型。在很多无线传感器网络的应用中,节点随机散播在目标区域内,节点分布函数、节点通信半径等信息不一定事先确切已知,无法应用数学分析类算法。

启发式算法根据锚节点的信息得到整个网络的距离与跳数关系,距离估计结果更符合跳数与距离的实际情况,且算法不需要节点分布模型和节点通信模型等信息,应用范围更加广泛。但是,这类算法需要锚节点数目多,锚节点运算量大,定位精度随着锚节点增加而改进,整体定位精度不高,因此出现了很多针对 DV-hop 的改进算法。

现有的 DV-hop 算法及其改进算法,采用距离为跳数和平均每跳距离乘积的模型,这种模型并不能反映每跳的期望距离和跳数的真实关系,距离估计不是无偏估计,基于现有模型的节点定位算法的节点定位精度也会受到影响。为此,采用本文所提出的新的期望距离与跳数的关系模型^[11],通过类似 DV-hop 算法的步骤,提出一种新的无偏的 DV-hop 改进算法(Unbiased Estimation DV-hop)。最后给出了距离估计和定位精度的仿真实验结果,并与传统 DV-hop 及其改进算法进行了比较分析。

1 DV-hop 算法基本原理

本节将详细介绍 DV-hop 算法的基本思路和步骤,以及基于最小二乘的 DV-hop 改进算法。DV-hop 算法是经典的基于跳数的距离估计算法,通过跳数与距离的关系模型,利用锚节点之间的关系得到模型的参数,进而确定节点间距离。DV-hop 算法所采用的模型为

$$d = Hh \quad (1)$$

式中: d 为估计距离; h 为节点间跳数; H 为平均每跳距离。DV-hop 算法分 3 个步骤。

步骤 1 所有节点获得它到所有锚节点的跳数。锚节点通过受控范围广播其坐标信息,同时所有节点获得它到锚节点的跳数信息。

步骤 2 每个锚节点利用已经得到的其他锚节点的位置信息和对应的跳数信息,计算平均每跳距离

$$H_i = \sum_{j=1, j \neq i}^m ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2} / \sum_{j=1, j \neq i}^m h_{ij} \quad (2)$$

式中: m 为锚节点数目, h_{ij} 为锚节点 i 和 j 之间的跳数; (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 分别指锚节点 i 和 j 的坐标。

进而,所有锚节点广播其平均每跳距离 H_i 。当待定位节点 u 收到该锚节点 i 的平均每跳距离后,代入式(1)得到节点之间的估计距离。

步骤 3 待定位节点在得到锚节点的坐标和到锚节点的距离之后,对每个锚节点都可得到如下方程

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = d_{iu}^2 \quad (3)$$

在收到 m 个锚节点的信息后,就得到了一个含有 m 个方程的非线性方程组。解此非线性方程组的方法有很多,本节采用引入新变量 $w = x^2 + y^2$ 的方法将方程组线性化求解。方程组以矩阵的形式表示

$$Ax = b \quad (4)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_m & -2y_m & 1 \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} d_{1u}^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ d_{2u}^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ \vdots \\ d_{mu}^2 - x_m^2 - y_m^2 \end{bmatrix}$$

将此方程的最小二乘解作为节点的估计位置,可得到如下公式

$$x_{LS} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (5)$$

现有众多对 DV-hop 的改进算法,大部分改进都是针对平均每跳距离的改进,其中采用最小二乘法求解平均每跳距离的算法简单有效,其计算锚节点的平均每跳距离的公式为

$$H_i = \sum_{j=1, j \neq i}^m h_{ij} ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2} / \sum_{j=1, j \neq i}^m h_{ij}^2 \quad (6)$$

2 无偏估计 UEDV-hop 算法

现有模型中距离为平均每跳距离和跳数乘积,并不能真实描述期望距离和跳数之间的关系。因此,基于现有模型的算法,其估计的距离并不是无偏估计,节点定位也会产生较大的误差。根据 DV-hop 算法及本文研究的期望距离与跳数的关系^[11],提出一种近似无偏估计的 DV-hop 节点定位算法,使估计距离等于该跳的期望距离,并改善节点的定位精度。

为了更清楚地描述 UEDV-hop 算法,首先将所提出的距离与跳数的新模型表示为

$$d = \begin{cases} 2r/3 & h = 1 \\ (h-1)H + \alpha & h > 1 \end{cases} \quad (7)$$

模型中有平均每跳距离 H 、偏差 α 和节点通信半径 r 3 个变量,它们之间的关系为

$$\alpha = r - 0.5H \quad (8)$$

因此,只须求得其中两个参数,就可得到完整的距离与跳数的关系,进而通过节点间跳数估计节点间的距离,最终确定待定位节点的位置。

2.1 通信半径已知

上述距离与跳数的新模型是基于网络拓扑各向同性的假设条件推导出来的。一般假设所有节点具有相同的通信半径。如果 r 已知,那么可以将 r 和 α 代入式(7)得到一个仅与 H 相关的模型

$$d = \begin{cases} 2r/3 & h = 1 \\ (h-1.5)H + r & h > 1 \end{cases} \quad (9)$$

UEDV-hop 算法通过现有锚节点之间的距离和跳数关系来估计 H 的值,并采用最小二乘法计算平均每跳距离。与 DV-hop 算法不同,式(9)将 1 跳节点和 h 跳节点($h > 1$)的距离分开描述,因此需用跳数大于 1 的锚节点对计算平均每跳距离 H 。

对锚节点 i ,选取所有到其跳数大于 1 的锚节点,将它们之间的距离和跳数代入式(9),可得

$$\hat{d}_{ij} = (h_{ij} - 1.5)H_i + r + \delta_{ij} \quad (10)$$

式中: $\hat{d}_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2}$ 为锚节点 i 和 j 之间的实际距离; h_{ij} 为锚节点 i 和 j 之间的跳数, $h_{ij} > 1$; δ_{ij} 为距离估计误差。

已知现有锚节点之间的真实距离和估计距离,那么估计距离的均方误差为

$$f = \sum_{i \neq j} \delta_{ij}^2 = \sum_{i \neq j} (\hat{d}_{ij} - (h_{ij} - 1.5)H_i - r)^2 \quad (11)$$

最小化估计距离的均方误差,即 $\partial f / \partial H_i = 0$,则

锚节点 i 的平均每跳距离为

$$H_i = \sum_{j=1, j \neq i}^m (\hat{d}_{ij} - r) / \sum_{j=1, j \neq i}^m (h_{ij} - 1.5) \quad (12)$$

在得到了锚节点 i 的平均每跳距离 H_i 和节点通信半径后,代入式(7)可得到待定位节点 u 到锚节点 i 的估计距离。

节点通信半径已知,本算法只须计算一个变量平均每跳距离 H_i ,锚节点的计算量小。1 跳节点的期望距离在圆盘模型和节点均匀分布假设下,恒等于 $2r/3$,因此 1 跳节点的估计距离均方误差最小。算法以估计距离的均方误差最小为条件,因此所得到的平均每跳距离更接近于锚节点数目多的跳数对应的情况。

2.2 通信半径未知

在无线传感器网络的工程应用中,节点的通信范围可以随着输入能量的变化而改变,因此很多情况下节点的通信半径是未知的。传统的 DV-hop 等算法不需要节点的通信半径。本节讨论在通信半径未知时 UEDV-hop 算法的实现。

将距离与跳数关系中通信半径用其他两个变量表示,可以得到

$$d = \begin{cases} 2(\alpha + 0.5H)/3 & h = 1 \\ (h-1)H + \alpha & h > 1 \end{cases} \quad (13)$$

和上节相同,式(13)分为两段描述距离和跳数的关系,需要用跳数大于等于 2 的锚节点对得到 H_i 和 α_i 的值。对任意锚节点 i ,将它的 2 跳及以上邻居锚节点的距离和跳数代入式(13)中相应的式子,就得到一个关于变量 H_i 和 α_i 的线性方程组

$$\hat{d}_{ij} = (h_{ij} - 1)H_i + \alpha_i \quad (14)$$

式(14)有两个未知数,因此至少需要两个方程才能得到确切的解,也即要求每个锚节点至少有两个 2 跳以上的相邻锚节点,才能确定该锚节点的距离与跳数的关系。

通过最小二乘法解式(14),很容易得到 H_i 和 α_i 的值。每个锚节点广播自身的 H_i 和 α_i 的值。当待定位节点 u 收到锚节点 i 的广播信息后,将节点 u 和锚节点 i 之间的跳数代入式(13),可以得到待定位节点 u 和锚节点 i 的估计距离。

一般情况下,每跳前进距离是随着跳数的增加而增加的,并趋近于一个固定值。该固定值随着节点密度增大趋近于 $r^{[11]}$,因此根据算法所得到的估计距离误差在 2 跳时最大。为改进 2 跳节点的估计距离,假设 2 跳节点均匀分布在以源节点为圆心、内

半径为 r 、外半径为 $r+H$ 的圆环内,那么 2 跳节点的期望距离可以表示为

$$d_{iu} = \alpha_i + H_i + \frac{1}{6} \frac{H_i^2}{2\alpha_i + 2H_i}, \quad h_{iu} = 2 \quad (15)$$

以此作为 2 跳节点的估计距离。至此,通过现有锚节点之间的关系,可得到所有节点到锚节点的估计距离,且不需要通信半径 r 的信息。

最后,将待定位节点到锚节点的估计距离和锚节点的坐标代入式(3)。在得到 3 个或更多锚节点的信息后,将方程组线性化,通过最小二乘法计算待定位节点的估计位置。

2.3 UEDV-hop 算法流程图

整个 UEDV-hop 算法的待定位节点及锚节点的定位算法流程图如图 1 所示。

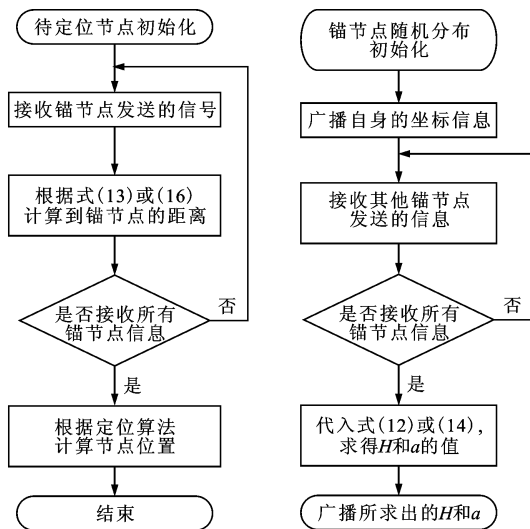


图1 待定位节点及锚节点的 UEDV-hop 定位流程图

3 仿真结果

本节从距离估计精度和定位精度的仿真两方面来考察 UEDV-hop 算法的性能。为了验证算法性能,本文利用 Matlab7.9 建立如下仿真环境,在 1×1 的正方形区域范围内,随机均匀分布 1 500 个节点,其中锚节点所占比例为 3%,锚节点均匀分布且坐标信息精确无误差。节点通信符合圆盘通信模型,且所有节点具有相同的通信半径($r=0.1$)。所有节点都可通过多跳的方式和其他任意节点通信,没有孤立节点。为了比较节点数目和锚节点比例对距离估计绝对误差和定位误差的影响,在其他参数不变的情况下,通过改变节点数目或锚节点比例进行仿真。

3.1 距离估计

3.1.1 不同跳数下算法的归一化误差均值及绝对

误差 为了验证距离估计算法的性能,采用归一化误差均值 e_M 和归一化绝对误差 e_A 评价算法性能,其定义为

$$e_M = (\hat{d}_i - d_i) / r \quad (16)$$

$$e_A = |d_i - \hat{d}_i| / r \quad (17)$$

首先,考察不同算法的归一化误差均值 e_M 随跳数变化的情况,仿真结果如图 2 所示。DV-hop 算法和 DV-hop(LS)算法的归一化误差均值在不同跳数下均不等于 0,这说明估计距离和该跳期望距离存在较大偏差。归一化误差均值在 1 跳时小于 0,说明 1 跳的期望距离大于平均每跳距离 H ,UEDV-hop 算法在不同跳数情况下归一化误差均值近似等于 0,这表明 UEDV-hop 算法的估计距离是近似无偏的。

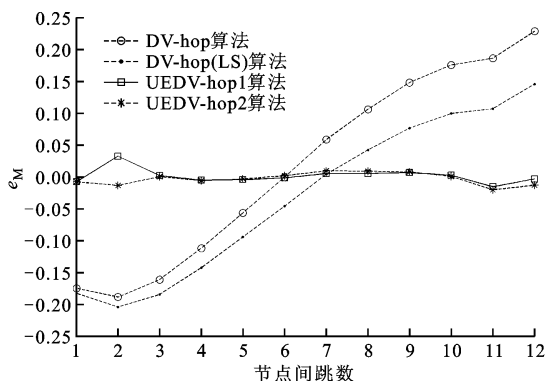


图2 不同跳数的归一化误差均值

图 3 比较了 4 种算法的归一化绝对误差随跳数的变化,可以看到 DV-hop 和 DV-hop(LS)算法的归一化绝对误差均大于 UEDV-hop 算法,6 跳的归一化绝对误差近似等于 UEDV-hop 算法。这表明归一化绝对误差受到估计距离和期望距离偏差的影响,偏差越大归一化绝对误差就越大。由图 2 可见,两种 UEDV-hop 的归一化绝对误差随着跳数增加而增加,且增加的幅度随着跳数增加而减小,这说明

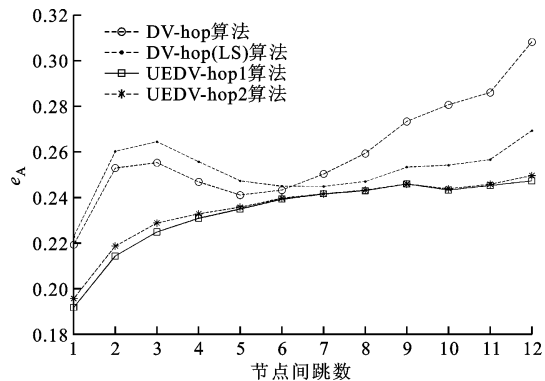


图3 不同跳数的归一化绝对误差

随着跳数的增加,相同跳数节点距离的分布更分散。

3.1.2 不同节点数目的归一化绝对误差 下面考察整体估计距离的绝对误差,对所有待定位节点到锚节点之间的距离,求其估计距离归一化绝对误差的平均值。图 4 比较了在不同节点数目下 4 种算法的归一化绝对误差 e_A ,其中锚节点比例设置为 3%。UEDV-hop1 和 UEDV-hop2 的归一化绝对误差最小,这表明所提算法的定位精度优于传统 DV-hop 算法及其改进算法。随着节点数目的增加,4 种算法的归一化绝对误差都随之减小,并趋于一个固定值,这说明基于跳数的距离估计精度有极限值。

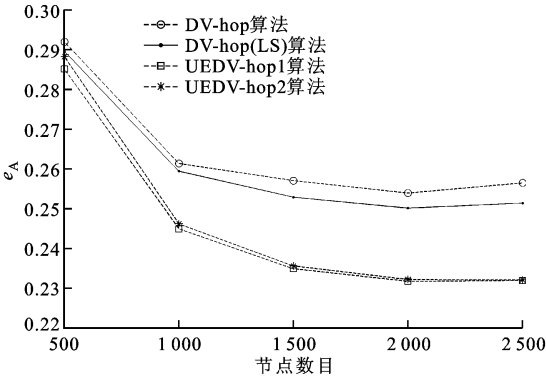


图 4 节点数目对归一化绝对误差的影响

3.1.3 不同锚节点比例的归一化绝对误差 图 5 对比了 4 种算法在不同锚节点比例下绝对误差 e_A 的变化,节点数目固定为 1 500。由图可见,随着锚节点比例增加,4 种算法的估计距离绝对误差都随之减小,并趋近于一个固定值。这是因为基于跳数的距离估计算法估计距离精度只与通信半径和网络连通度相关,锚节点比例的增加只使得估计距离接近期望距离,从而减小了估计距离误差。

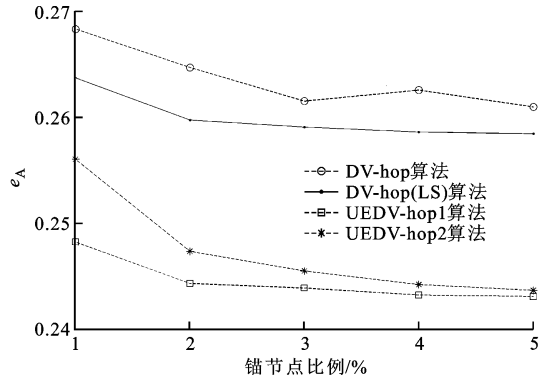


图 5 锚节点比例对归一化绝对误差的影响

3.2 定位精度

距离估计的最终目的是用于节点的定位,本节考察所提出的距离估计算法的节点定位精度。用归

一化均方误差 e_R 考察节点定位精度,其定义为

$$e_R = \sum_{i=1}^m [((x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2)^{1/2}] / (n - m)r \tag{18}$$

首先考察 4 种算法在不同节点数目下的定位精度,锚节点数目固定为 3%,仿真结果如图 6 所示。由图可见,4 种算法定位结果的归一化均方误差都随着节点数目增加而减小。两种 UEDV-hop 算法的节点定位误差几乎相等,且小于 DV-hop 算法和 DV-hop(LS)算法的定位结果。在节点数目为 2 500 时,虽然 UEDV-hop 算法的归一化绝对误差和 DV-hop 算法相差 0.02r 左右,但 UEDV-hop 算法的归一化均方误差约为 DV-hop 算法的一半,这说明无偏的距离估计对定位结果的影响大。

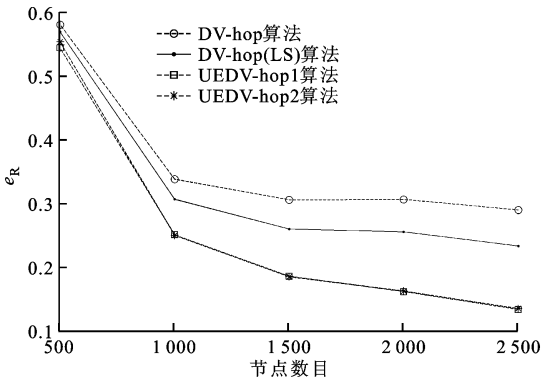


图 6 节点数目对归一化均方误差的影响

图 7 考察 4 种算法在不同锚节点比例下的定位精度,节点数目固定为 1 500。由图可见,随着锚节点比例增加,4 种算法的归一化均方误差随之减小,并趋近于一个固定值。这是由于锚节点的增加,有助于估计距离更接近期望距离,使定位误差最终趋近于无偏估计时的定位误差。其中,两种 UEDV-hop 算法的归一化均方误差最小。

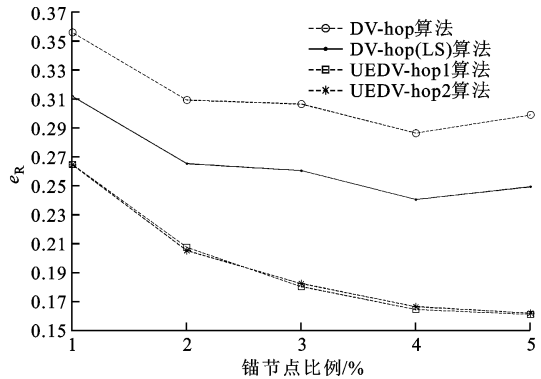


图 7 锚节点比例对归一化均方误差的影响

4 结 论

在无线传感器网络中,无需测距的节点定位算法是节点定位研究中的难题之一。针对传统基于跳数的定位算法,例如 DV-hop 算法不能满足无偏的距离估计,使得定位误差大的问题,首先提出了期望距离与跳数关系的新模型,进而利用锚节点来估计新模型的参数,提出了无偏估计 DV-hop 新算法,并根据节点通信半径是否已知两种应用情况推导了两种 UEDV-hop 求解形式。最后,仿真实验表明,所提出的两种 UEDV-hop 算法近似属于无偏的距离估计算法,且两种 UEDV-hop 算法在距离估计和节点定位精度上相对于 DV-hop 算法及 DV-hop(LS)算法都有较大提高,UEDV-hop 算法在节点数目等于 2 500 时,定位精度比 DV-hop 算法提高了 55%。

参考文献:

- [1] MAO Guoqiang, FIDAN B, ANDERSON B. Wireless sensor network localization techniques [J]. Computer Networks, 2007, 51(10): 2529-2553.
- [2] 周旭,李善仓,王新珩. 大规模传感器网络局部半定规划的节点定位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 38-42.
ZHOU Xu, LI Shancang, WANG Xinheng. Nodes locating algorithm based on local semi-definite programming for large scale wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(8): 38-42.
- [3] 李善仓,傅鹏,张德运. 无线传感器网络中的分布式节点定位方法 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(12): 1418-1422.
LI Shancang, FU Peng, ZHANG Deyun. Distributed nodes localization method in wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(12): 1418-1422.
- [4] 王文杰,张渭乐,殷勤业. 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 61-66.
WANG Wenjie, ZHANG Weile, YIN Qinye. A distributive localization method for wireless sensor networks using angle of departure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(2): 61-66.
- [5] 孔庆茹,杨新宇,闫超,等. 一种基于接收信号强度指示的改进型定位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 147-151.
KONG Qingru, YANG Xinyu, YAN Chao, et al. Improved localization algorithm based on received signal

strength indicator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2): 147-151.

- [6] NATH S, EKAMBARAM V N, KUMAR A, et al. Theory and algorithms for hop-count-based localization with random geometric graph models of dense sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2012, 8(4): 111-152.
- [7] NICULESCU D, NATH B. DV based positioning in Ad Hoc networks [J]. Telecommunication Systems, 2003, 22(1): 267-280.
- [8] KUMAR S, LOBIYAL D. An advanced DV-hop localization algorithm for wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2012, 71(2): 1365-1385.
- [9] WANG Yun, WANG Xiaodong, WANG Demin, et al. Range-free localization using expected hop progress in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2009, 20(10): 1540-1552.
- [10] VURAL S, EKICI E. On multihop distances in wireless sensor networks with random node locations [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 540-552.
- [11] WEI Quanrui, HAN Jiuqiang, ZHONG Dexing, et al. An improved multihop distance estimation for DV-Hop localization algorithm in wireless sensor networks [C] // Proceedings of the IEEE 76th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-5.

[本刊相关文献链接]

汪志伟,曹建福,郑辑光. 一种面向分簇无线传感器网络的多信道跨层协议. 2013, 47(6): 61-67. [doi: 10. 7652/xjtuxb201306011]

李彬,王文杰,殷勤业,等. 无线传感器网络节点协作的节能路由传输. 2012, 46(6): 1-6. [doi: 10. 7652/xjtuxb201206001]

李彬,王文杰,殷勤业,等. 一种利用天线旋转的无线传感器网络定位算法. 2011, 45(4): 60-66. [doi: 10. 7652/xjtuxb201104011]

杨新宇,孔庆茹,戴湘军. 一种改进的加权质心定位算法. 2010, 44(8): 1-4. [doi: 10. 7652/xjtuxb201008001]

何欣,桂小林,安健. 面向目标覆盖的无线传感器网络确定性部署方法. 2010, 44(6): 6-9. [doi: 10. 7652/xjtuxb201006002]

王文杰,张渭乐,殷勤业. 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法. 2010, 44(2): 61-66. [doi: 10. 7652/xjtuxb201002013]

(编辑 武红江)