

基于萤火虫群的无线传感器网络节点定位方法

孙 斌¹, 王新勇²

(1 内蒙古科技大学 经济与管理学院, 内蒙古 包头 014010; 2 河南科技大学 电子信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 针对无线传感器网络中节点定位精度不高的问题, 基于萤火虫群算法提出了一种新的定位方法(Node Localization based on Glowworm Swarm, NLGS). 该方法首先结合锚点信息, 给出了三维空间下未知节点位置的计算方法和误差优化模型, 并利用萤火虫群算法对目标函数进行求解, 以达到快速收敛的目的. 通过利用 OPNET 进行仿真实验, 研究了影响该方法的关键因素. 实验结果表明, 相比于其他算法, NLGS 具有较好的适应性.

关键词: 无线传感器网络; 节点定位; 精度; 萤火虫群; 误差

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)02-0005-04

The Node Localization Method of Wireless Sensor Network Based on Glowworm Swarm

SUN Bin¹, WANG Xin-yong²

(1 School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2 College of Electronic Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In order to mitigate the lower accuracy of node localization in wireless sensor network, a new algorithm NLGS (Node Localization based on Glowworm Swarm) is proposed by glowworm swarm algorithm. In this algorithm, the calculation method of unknown node localization in three-dimensional space and the error optimization model is presented with anchor at first, and the objective function is solved by glowworm swarm algorithm, which is to achieve the fast convergence, a simulation with OPNET was conducted to study the key influence factors of NLGS. The result shows that, compared to other algorithm, NLGS has better adaptability.

Key words: wireless sensor network; node localization; accuracy; glowworm swarm; error

1 引言

随着无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的迅速发展,其节点定位技术广泛应用于交通管理、环境监测和目标跟踪等领域^[1]. 不仅很多 WSN 应用都依赖于节点的地理位置,而且网络管理和路径选择也需要借助节点位置信息. 所以, WSN 节点定位算法成为当前传感器领域研究的热点.

按照定位结果来划分, WSN 定位方法可分为绝对定位方法与相对定位方法^[2]. 绝对定位方法通过预先配置位置的节点(称为锚点)作为参照物,各

未知节点根据锚点所提供的地理位置进行定位,以此产生全局绝对坐标系. 而相对定位算法无需锚点信息,只需未知节点通过相邻坐标进行转换,最终产生全局相对坐标系. 目前典型的相对定位算法主要有 Accurate Anchor-Free、SDGPSN、SPA 和 MAP-Growing 等. 文献[3]中通过结合锚点信号强度和未知节点运动向量的变化,提出了一种新的 WSN 移动节点定位算法. 文献[4]中通过获取具有射频定位功能的移动节点和速度信息,建立了一种基于位姿评估技术的自主移动节点定位算法,以此计算相对定位轨迹并修正累积误差. 但是由于绝对定位方法过多依赖于锚点信息,其定位精度受该类

收稿日期: 2013-04-01; 修回日期: 2013-05-29

基金项目: 内蒙古科技大学创新基金(2011NCL029); 国家自然科学基金项目(10901144)

节点部署影响较大. 此外, GPS 信号的覆盖范围以及障碍物的遮盖都将对定位精度产生重要影响, 所以很有必要对相对定位算法进行深入研究.

针对上述存在的问题, 本文在传统二维平面定位方法的基础上, 建立三维空间的定位方法和误差分析模型, 并结合萤火虫群算法^[5-6]对目标函数进行求解, 最后通过仿真实验研究影响该方法的关键因素.

2 WSN 节点定位方法

WSN 中未知节点主要通过已知少量的锚节点信息进行定位, 在通信范围内可以直接通信的节点为邻居节点. 传统的定位方法主要是针对二维平面来讨论的, 典型代表是基于距离的最小二乘法, 其原理如图 1 所示, 其中, Node 表示未知节点, 坐标为 (x, y) , $N_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示已知锚点, 坐标分别为 (x_i, y_i) . 令 Node 与 N_i 之间的测量距离为 $l_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 则满足:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = l_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = l_2^2 \\ \dots \\ (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 = l_m^2 \end{cases} \quad (1)$$

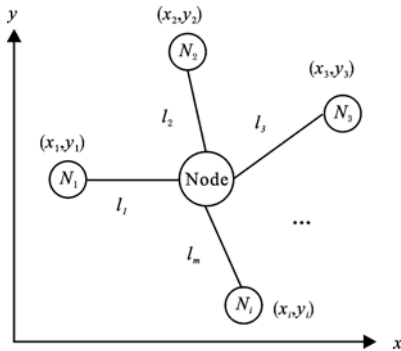


图 1 二维平面节点定位

将式(1)进行变化获得线性方程组, 然后采用标准的最小二乘法便可以求解. 根据上述原理, 这里将二维平面下的未知节点定位方法推广到三维空间, 如图 2 所示. 假设未知节点 Node 的坐标为 (x, y, z) , 已知锚点 $N_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 那么 Node 与 N_i 之间的测量距离 $l_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 则满足:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = l_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = l_2^2 \\ \dots \\ (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 = l_m^2 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)中前 $m-1$ 个方程减去第 m 个方程得

到

$$\begin{cases} 2(x_1 - x_m)x + 2(y_1 - y_m)y + 2(z_1 - z_m)z = \\ x_1^2 - x_m^2 + y_1^2 - y_m^2 + z_1^2 - z_m^2 - l_1^2 + l_m^2 \\ 2(x_2 - x_m)x + 2(y_2 - y_m)y + 2(z_2 - z_m)z = \\ x_2^2 - x_m^2 + y_2^2 - y_m^2 + z_2^2 - z_m^2 - l_2^2 + l_m^2 \\ \dots \\ 2(x_{m-1} - x_m)x + 2(y_{m-1} - y_m)y + \\ 2(z_{m-1} - z_m)z = x_{m-1}^2 - x_m^2 + \\ y_{m-1}^2 - y_m^2 + z_{m-1}^2 - z_m^2 - l_{m-1}^2 + l_m^2 \end{cases} \quad (3)$$

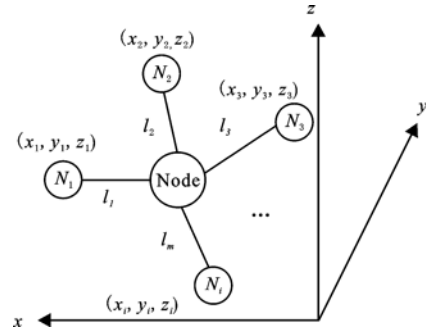


图 2 三维空间节点定位

令:

$\alpha =$

$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_m) & 2(y_1 - y_m) & 2(z_1 - z_m) \\ 2(x_2 - x_m) & 2(y_2 - y_m) & 2(z_2 - z_m) \\ \dots & \dots & \dots \\ 2(x_{m-1} - x_m) & 2(y_{m-1} - y_m) & 2(z_{m-1} - z_m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_m^2 + y_1^2 - y_m^2 + z_1^2 - z_m^2 - l_1^2 + l_m^2 \\ x_2^2 - x_m^2 + y_2^2 - y_m^2 + z_2^2 - z_m^2 - l_2^2 + l_m^2 \\ \dots \\ x_{m-1}^2 - x_m^2 + y_{m-1}^2 - y_m^2 + z_{m-1}^2 - z_m^2 - l_{m-1}^2 + l_m^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A = [x \ y \ z]^T \quad (6)$$

则有

$$\alpha A = \beta \quad (7)$$

采用标准的最小二乘法可以将上述方程组转化为

$$A = (\alpha^T \alpha)^{-1} \alpha^T \beta \quad (8)$$

但是由于测量距离 l_i 本来具有误差, 如果误差较大, 则获得解的精度误差将很大. 因此, 可以将此问题转化为启发式方法进行求解. 令 Node 与 N_i 之间的实际距离为 $d_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 测量距离 l_i 所产生的误差为 $\theta_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 则满足:

$$|d_i - l_i| \leq \theta_i \quad (9)$$

为了获得精度较高的解, 这里建立如下目标函数 $f(x, y, z)$:

$$f(x, y, z) = \min(\sum_{i=1}^m ((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - l_i^2)) \quad (10)$$

S. T. :

$$\begin{cases} |(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 - l_1^2| \leq \theta_1^2 \\ |(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 - l_2^2| \leq \theta_2^2 \\ \dots \\ |(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 - l_m^2| \leq \theta_m^2 \end{cases} \quad (11)$$

当目标函数 $f(x, y, z)$ 取最小值时,总的精度将最高. 对于目标函数的求解属于优化问题,传统的线性规划或者单纯法具有一定的局限性,因此本文利用人工智能方法进行求解.

3 萤火虫群算法

萤火虫群算法已经在很多领域进行应用,它避免了其他算法的个体群聚现象以及局部最优. 萤火虫群中的个体依靠荧光素来体现对目标的吸引力,其亮度越大其吸引力越强. 在实际算法处理中,一般将个体荧光素与所处位置的目标值进行关联,亮度越大的个体表示所处位置越好,具有较佳的目标值. 个体依靠动态决策域来确认领域内的其他个体,并按照一定概率选择荧光素值高于自身的其他个体进行移动. 因此,基于这种原理可以将萤火虫群划分为不相交的子群,最终萤火虫会聚集在多个位置上.

针对上述建立的目标函数,本文结合萤火虫群优化算法提出了一种新的求解算法(Node Localization based on Glowworm Swarm, NLGS),具体流程如下:

(1) 在 $t=0$ 时初始化 WSN 网络拓扑结构以及相关参数,并将目标函数 f 视作萤火虫个体,测量距离 l_i 视作萤火虫移动距离,测量误差 θ_i 视作萤火虫的荧光素(荧光素强度越大意味着测量误差 θ_i 越小),同时令萤火虫数量为 n ,荧光素系数为 η ,第 i 个萤火虫个体在第 t 代时位置为 $r_i(t)$,移动步长大小为 Δd ,第 t 代种群中第 i 个萤火虫的荧光素值为 $r_i(t)$;

(2) 根据式(12)计算当前萤火虫 i 与萤火虫 j 的距离:

$$l_{ij}(t) = \sqrt{\sum (r_i - r_j)^2} \quad (12)$$

(3) 根据式(13)对萤火虫 i 进行荧光素更新:

$$\varphi_i(t) = \eta \varphi_i(t-1) + (1 - \eta) l_{ij}(t) \quad (13)$$

(4) 根据式(14)和(15)对萤火虫 i 以概率 p 执

行位置更新操作:

$$r_i(t+1) = r_i(t) + \frac{\Delta d}{l_{ij}(t)}(r_i(t) - r_j(t)) \quad (14)$$

$$p(t) = \frac{\varphi_i(t) - \varphi_i(t)}{1 + \varphi_i(t)} \quad (15)$$

(5) 根据式(16)对萤火虫 i 执行随机飞行操作:

$$r_o(t+1) = r_o(t) + \Delta d(\lambda - 0.5)r' \quad (16)$$

式中, λ 为 0 到 1 之间的随机数,若 $\lambda < 0.5$,则 $r' = r_1 - r_o(t)$,否则 $r' = r_o(t) - r_2$, r_1 和 r_2 分别为临域上下边界,而 $r_o(t)$ 表示第 t 代种群的全局最优位置;

(6) 根据萤火虫 i 寻优过程获得当前萤火虫最优移动距离和最优个体,暂时将其作为全局最优移动距离 d_o 和全局最优个体 f_o ,并跳转到步骤(2),对所有萤火虫个体重复执行该操作,以此获得第 t 代种群的全局最优值;

(7) 判断第 t 代种群的全局最优移动距离是否小于其阈值 d ,如果是则跳转到步骤(9);

(8) 令 $t = t + 1$,判断是否超过最大迭代次数,如果未超过则跳转到步骤(2),继续计算下一代全局最优值,否则跳转到步骤(9);

(9) 输出当前 f_o ,即为所求最优解;

算法结束.

4 仿真实验

利用 OPNET 进行仿真实验. 首先建立如图 2 所示的网络拓扑结构图,设置空间区域为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,测距半径为 20 m ,萤火虫个体数量为 30,移动步长为 0.3,荧光素系数为 0.6,最大迭代次数为 300. 为了更加逼真模拟真实情况,本文随机产生锚点位置坐标和未知节点位置坐标,并且将提出的 NLGS 算法与最小二乘法^[7]进行比较. 同时这里采用未知节点的定位结果的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为评价指标:

$$\text{RMSE} =$$

$$\sqrt{E((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2)} \quad (17)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为未知节点实际坐标, (x, y, z) 为 NLGS 算法对目标函数 $f(x, y, z)$ 求解的坐标位置. 设置总节点数量为 200,在图 3 中给出了不同锚点比例下(锚点比例定义为锚点数量与总节点数量之比),NLGS 算法与最小二乘法之间的 RMSE 比较情况. 从图 3 可以看出,随着锚点比例的增加,均方根误差 RMSE 随之减小. 对于相同均方根误差 RMSE 下, NLGS 算法所需锚点数量远远小于最小二乘法,因此整体性能上 NLGS 算法较优. 经过数据分析, NLGS

算法比最小二乘法平均误差降低了 9.23%。

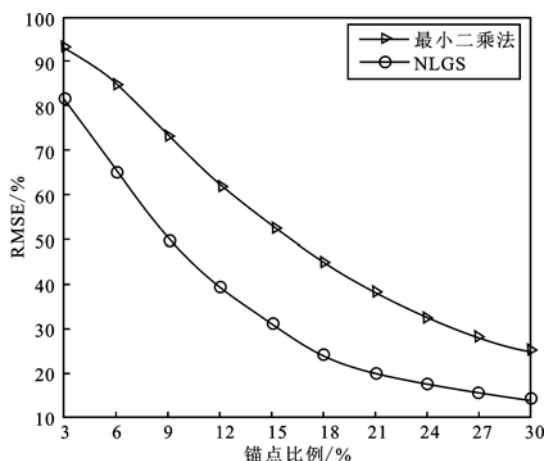


图 3 不同锚点比例的 RMSE 比较情况

同时,设置锚点比例为 10%,图 4 给出了不同节点密度下(节点密度定义为总节点数量与空间区域之比,其节点分布随机产生),NLGS 算法与最小二乘法之间 RMSE 的比较情况.从图 4 可以看出,节点密度增加有利于降低均方根误差 RMSE.这是由于节点密度增加可以提高网络的连通度,从而使得测量更加准确。

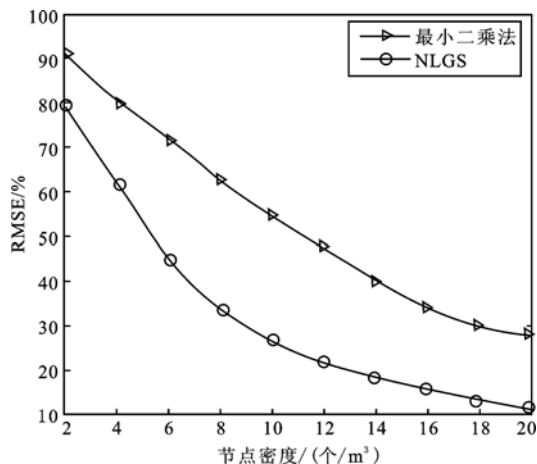


图 4 不同节点密度的 RMSE 比较情况

最后,图 5 给出了不同测距半径下两种算法的 RMSE 比较情况.由图中可知,NLGS 算法能够比最小二乘法到达更小的定位误差,尤其是在测量半径较小时(如介于(17, 20))优势更加明显.这说明 NLGS 算法在定位稀疏 WSN 时性能更佳,能够更快达到收敛。

5 结束语

本文在传统二维平面定位方法的基础上,建立了三维空间的定位方法和误差分析模型,并结合萤火虫群算法对目标函数进行求解.同时通过仿真实

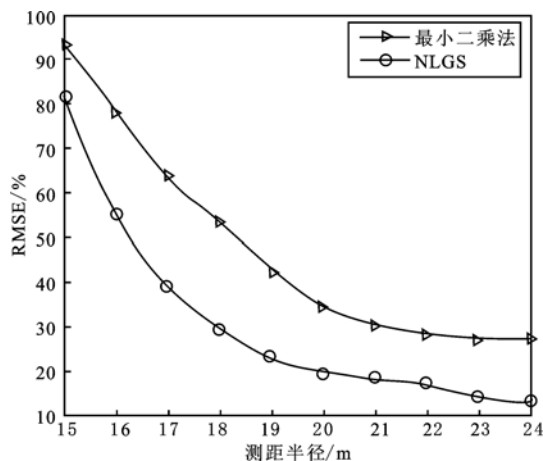


图 5 不同测距半径的 RMSE 比较情况

验研究了该方法与最小二乘法之间的性能状况,分析了锚点比例、节点密度和测距半径对定位结果的均方根误差影响情况,结果表明本文提出的定位方法具有较好的适应性和收敛性.由于无线传感器网络节点往往受到能量限制,节点的生存周期处于动态变化过程,因此,传统的静态无线传感器网络定位方法不能满足实际需求,在后续研究中,可以考虑结合无线传感器网络的移动性以及距离无关的定位算法来建立一套完整的定位模型。

参考文献:

- [1] Kim E, Kim K. Distance estimation with weighted least squares for mobile beacon-based localization in wireless sensor networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(6):559-562.
- [2] Liao H, Lee C, Kedia S P. Mobile anchor positioning for wireless sensor networks [J]. IET Communications, 2011, 5(7): 914-921.
- [3] 李东岳,王英龙,魏诺,等. 信号强度和运动向量结合的无线传感器网络移动节点定位[J]. 电子学报, 2010, 38(2A): 221-224.
- [4] 陈桂忠,董利达. 基于位姿评估的无线传感器网络自主移动节点定位技术[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2428-2432.
- [5] 周永权,黄正新,刘洪霞. 求解 TSP 问题的离散型萤火虫群优化算法[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1164-1170.
- [6] Krishnanand K N, Ghose D. Glowworm swarm optimization: new method for optimizing multi-modal functions [J]. Computational Intelligence Studies, 2009, 1(1): 93-119.
- [7] 罗海勇,李锦涛,赵方,等. 基于软约束模式的加权最小二乘节点定位算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(21): 5767-5773.

(下转第 13 页)

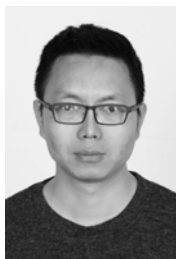
- clic LDPC codes by the chinese remainder theorem[J]. IEEE Communications Letters, 2005(9):823-825.
- [2] Liu Y, Wang X, Chen R, et al. Generalized combining method for design of quasi-cyclic LDPC codes [J]. IEEE Communications Letters, 2004(12):392-394.
- [3] Fan J L. Array codes as low-density parity-check codes [C]// Proc. 2nd Int. symp. turbo Codes and related topics. Brest, France, 2000(4-7):553-556.
- [4] Milenkovic O, Kashyap N, Leyba D. Shortened array codes of large girth[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006(52):3707-3722.
- [5] Jiang X, Lee M. Large girth quasi-cyclic LDPC codes based on the chinese remainder theorem[J]. IEEE Communications Letters, 2009(13):342-344.
- [6] Lan L, Zen L, Tai Y Y, et al. Construction of quasi-cyclic LDPC codes for AWGN and binary erasure channels: a finite field approach[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2007,53(7):2429-2458.
- [7] Kang J, Huang Q, Zhang L, et al. Quasi-cyclic LDPC codes: an algebraic construction [J]. IEEE Trans. Commun, 2010,58(5):1383-1396.
- [8] Zhang L, Lin S, Ghaffar K A. Quasi-cyclic LDPC codes on cyclic subgroups of finite fields[J]. IEEE Trans. Commun. , 2011,59(9):2330-2336.

作者简介:

徐 华 (1975—), 博士, 副教授. 研究方向为信道编码、协作通信及压缩感知等.

(上接第8页)

作者简介:



孙 斌 男, (1974—), 博士, 讲师. 研究方向为网络流量工程、排队论在计算机网络中的应用.



许 炜 男, (1984—), 博士. 研究方向为网络控制、RFID、物联网在工业中的投资应用分析.