



基于运动轨迹捕捉与正交覆盖的 WSN 节点定位算法

杜 刚^{1a}, 张善文^{1b}, 邱力军²

(1. 西京学院 a. 机电技术系; b. 信息工程学院, 西安 710123;
2. 空军军医大学 生物医学工程系, 西安 710012)

摘 要: 传统无线传感器网络(WSN)节点定位算法难以适应节点快速移动的高拓扑变化环境,导致识别误差较大。针对该问题,提出一种基于运动轨迹捕捉与正交覆盖机制的 WSN 节点定位算法。利用捕捉锚节点射频强度的方法对节点运动轨迹进行覆盖定位,获取性能最佳的锚节点及其坐标,改善因锚节点失效或信号强度弱导致的弱定位现象。在此基础上,采用拉格朗日插值函数设计运动轨迹捕捉方法,联合纵向及横向坐标维度进行节点运动矢量的精确捕捉,在精度可控的条件下实现对下一时刻节点坐标的初步预测,优化锚节点对运动节点的区域覆盖。同时利用正交覆盖方式设计基于过滤机制的区域优化方法,提高覆盖区域坐标抽样和网络信号定位精度。仿真结果表明,与 2S-HGR 机制和 TDLM 机制相比,该算法具有较好的动态路径捕捉效果与坐标定位准确性。

关键词: 无线传感器网络;节点定位;运动轨迹捕捉;正交覆盖;坐标抽样

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式:杜刚,张善文,邱力军.基于运动轨迹捕捉与正交覆盖的 WSN 节点定位算法[J].计算机工程,2020,46(3):157-162,171.

英文引用格式:DU Gang, ZHANG Shanwen, QIU Lijun. WSN node location algorithm based on motion trajectory capture and coupled orthogonal coverage[J]. Computer Engineering, 2020, 46(3): 157-162, 171.

WSN Node Location Algorithm Based on Motion Trajectory Capture and Coupled Orthogonal Coverage

DU Gang^{1a}, ZHANG Shanwen^{1b}, QIU Lijun²

(1a. Department of Mechanical and Electrical Technology; 1b. College of Information Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China;
2. Department of Biomedical Engineering, Air Force Military Medical University, Xi'an 710012, China)

【Abstract】 Existing node location algorithms for Wireless Sensor Network (WSN) are not applicable to environments with frequent topological changes, as rapid motion of nodes reduces the accuracy of recognition. To address the problem, this paper proposes a WSN signal detection algorithm based on motion trajectory capture and coupled orthogonal coverage mechanisms. The algorithm captures the radio frequency intensity of the anchor nodes to cover their motion trajectories, and obtains the anchor node with the best performance and its coordinate. So the inaccurate location phenomenon caused by anchor node failure and weak signal strength can be improved. On this basis, it constructs a motion trajectory capture method based on Lagrange interpolation function, using vertical and horizontal coordinates to implement precise capture for the motion vector of nodes. On this basis, the next-moment coordinate of the node is preliminarily predicted at a controllable precision, so as to optimize the regional coverage of the anchor node on moving nodes. Orthogonal coverage is also adopted to design a coverage optimization method based on the filtering mechanism to improve the precision of coordinate sampling in the covered area and the precision of network node location. Simulation results show that the proposed algorithm has better performance in dynamic path capture and higher accuracy of coordinate location than 2S-HGR and TDLM mechanisms.

【Key words】 Wireless Sensor Network(WSN); node location; motion trajectory capture; orthogonal coverage; coordinate sampling
DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0053662

基金项目:国家自然科学基金(61473237);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM2-6096)。

作者简介:杜 刚(1980—),男,副教授、硕士,主研方向为无线传感器网络;张善文,教授、博士;邱力军,副教授、博士。

收稿日期:2019-01-11 **修回日期:**2019-03-18 **E-mail:**xjdugang1980ele@sina.com

0 概述

网络节点定位算法是无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)从固定式逐步转向移动式部署过程的核心解决方案之一^[1]。固定式 WSN 中节点坐标是固定不变的,当且仅当节点处于失效状态时根据节点坐标进行失效节点的替换^[2]。由于移动状态下 WSN 节点拓扑距离不断发生变化,采用固定式 WSN 中常用的节点定位算法时需要频繁进行网络数据通信^[3],且需要采用复杂校验机制进行定位精度提升,容易因网络节点能量消耗过大而降低网络的适用性能^[4]。因此,解决移动节点条件下的 WSN 节点定位问题,成为 WSN 的热门研究方向^[5]。

文献[6]鉴于当前机制普遍存在拓扑节点感知延迟度较高、难以适应移动节点的不足,提出一种基于盒式锚区域捕捉机制的 WSN 信号定位算法,采用信号覆盖重叠域维度裁决的方式,选取覆盖度最高的节点作为锚节点并引入三角定位机制进行信号方位捕捉。该机制能够满足拓扑变动条件下的网络信号定位需求,但也存在仅能适应节点稀疏环境的不足,难以进一步在实践中推广应用。文献[7]提出一种基于采样盒-密度映射机制的 WSN 信号定位算法,通过捕捉功率谱密度最强的节点作为锚节点并在节点稀疏密度条件下持续发挥定位作用,获得了较高的定位精度。与文献[6]算法相比,该机制虽能在节点稀疏的情况下获得较好的定位精度,但在节点密集条件下适应度不佳,特别是在高密度环境下网络链路抖动严重,具有较大的局限性。针对文献[6-7]算法难以同时适应不同节点密度环境的问题,文献[8]提出了一种基于迭代预测采样机制的 WSN 信号定位算法,通过引入最小二乘预测机制并针对捕捉到的锚节点进行过滤采样,显著提高了捕捉成功率,并且能够适应低密度锚节点的网络情况,但该算法由于主要适用于固定节点条件下的 WSN 环境,对拓扑变化较快的移动式 WSN 适应性较差。

为改善 WSN 信号定位对高拓扑变化环境的适应性,提高检测精度,本文提出一种基于运动轨迹捕捉与正交覆盖机制的 WSN 节点定位算法。通过覆盖定位方式选择性能最优的锚节点进行定位,应对节点运动过程中因拓扑结构显著变化导致的链路抖动现象。同时基于拉格朗日插值法进行运动轨迹捕捉,定量获取横向及纵向坐标维度,捕捉节点运动矢量并预测下一时刻节点坐标,将节点坐标精确定位于多个锚节点所共同决定的覆盖区域内,从而有效提高定位精度。

1 WSN 节点定位算法

本文提出的基于运动轨迹捕捉与正交覆盖机制的 WSN 网络信号定位检测算法过程如图 1 所示。

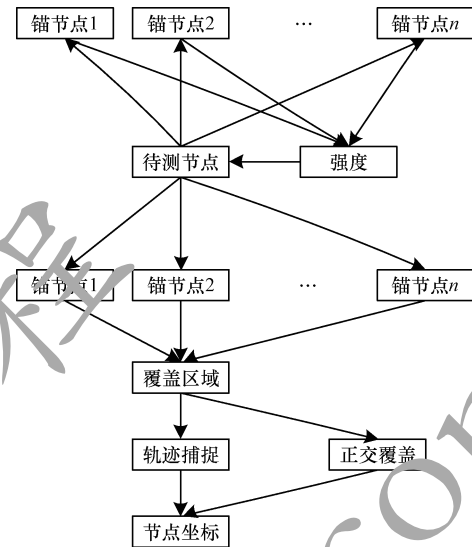


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Procedure of the proposed algorithm

本文算法通过以下 3 个阶段实现对 WSN 网络节点的精确定位

1) 信号发射测距与覆盖定位,使算法能够便捷地获取锚节点定位信号,且选取的锚节点具有明显的定位优势,可减少因锚节点失效或信号强度较弱而导致的弱定位现象。

2) 基于拉格朗日插值函数的运动轨迹捕捉方法,获取节点坐标及速度条件下后能以较高精度进行定位预测,修正节点的运动矢量,获取下一时刻节点运动方位,按时捕捉节点的运动轨迹。

3) 基于过滤机制的区域优化,引入基于随机数机制的正交覆盖方式,在已获取的捕捉运动轨迹基础上,对下一时刻节点所在的坐标进行精确预测,可实现覆盖区域内的精度精确控制。

1.1 信号发射测距与覆盖定位

由于 WSN 节点均采用射频方式进行数据通信,因此实际过程中需要采取一定方式获取待测节点与基准节点间的物理拓扑距离^[9]。考虑到网络覆盖环境往往具有复杂度较高的特性(信号呈现多径传输以及无线链路覆盖范围内存在障碍物等可能),本文采用文献[9]提出的对数路径测距机制实现对物理拓扑距离的精确测量。首先通过式(1)获取待测信号的射频强度 $R(G, d)$ 。

$$R(G, d) = P + G - L(\mu, \sigma) - \sum_{i=1}^n \frac{e}{i} \ln\left(\frac{d_i}{d}\right) \quad (1)$$

其中: P 表示 WSN 节点信号的设计发射强度; G 表

示 WSN 节点发射信号时内部天线的发射增益; L 表示信道噪声,一般为高斯噪声,其均值为 μ , 方差为 σ ; e 表示自然对数; d 表示节点当前覆盖范围。显然,当有多条路径时,路径损耗较小。

在实践中,式(1)所示模型可以直接通过节点进行计算,当仅当信道噪声强度过高时失效。因此,通过该模型可直接获取当前节点的覆盖范围 d 。由于路径呈现多条时,节点接收到的信号会呈现泊松分布特性^[10],因此仅需要获取最大覆盖范围即可,如图 2 所示。

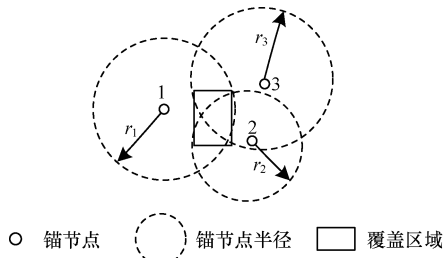


图 2 节点覆盖示意图
Fig. 2 Node coverage schematic diagram

覆盖范围 d 可由式(2)获取^[11]。

$$d = \max d_i \times e^{\frac{P+G-L(\mu,\sigma)-R(G,d)}{\sigma}} \quad (2)$$

当 WSN 节点处于移动状态时需要就近获取 3 个锚节点,以便能够准确获取自身的坐标位置。由于锚节点处于固定位置,因此仅当 WSN 能够进入图 2 所示的覆盖区域内时,首先通过式(1)接收 3 个锚节点的射频强度,进入覆盖区域内时利用式(3)~式(6)获取其当前区域估计。

$$x(\text{low}) = \min(x_i - r_i) \quad (3)$$

$$x(\text{high}) = \max(x_i - r_i) \quad (4)$$

$$y(\text{low}) = \min(y_i - r_i) \quad (5)$$

$$y(\text{high}) = \max(y_i - r_i) \quad (6)$$

其中: $x(\text{low})$ 、 $x(\text{high})$ 、 $y(\text{low})$ 、 $y(\text{high})$ 分别表示图 2 中 WSN 节点移动过程中对应的横轴与纵轴的边际值; i 取值为 1~3,分别表示图 2 中 3 个锚节点; r_i 表示定位距离,获取方式如式(7)所示。

$$r_i = \min(R_i, d_i) \quad (7)$$

其中: d_i 表示待测节点与 3 个锚节点之间的覆盖范围,可通过式(2)所示模型获取; R_i 表示 3 个锚节点中,覆盖能力最强的锚节点的覆盖半径。

当网络总体节点密度较高且节点移动速度较快时,获取的定位距离不仅波动范围较大而且可能处于不断下降的态势,如文献[10]所提及的 100 个/m² 的节点密度、移动速度均大于 2 m/s 的情况。由图 3 可知,定位精度随着节点运动时间的不断增加而呈现强烈波动,定位误差呈现稳定性较差的趋势,显然网络的定位效果也出现了一定的波动,因此,需要采取必要的精度修正措施。

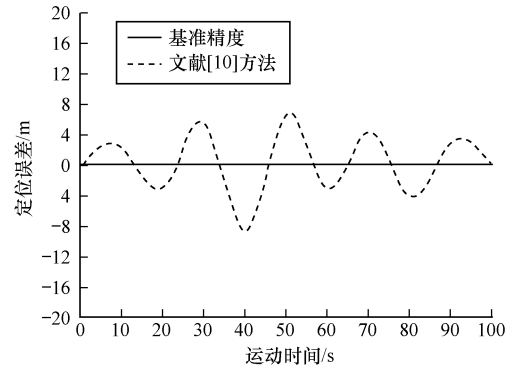


图 3 文献[10]所述情况下定位误差随运动时间的变化
Fig. 3 Positioning error varying with the movement time in the case described in literature[10]

1.2 基于拉格朗日插值法的节点运动轨迹捕捉

文献[12]采用实践中常用的大数据统计机制进行精度修正,但该机制也存在着统计复杂的不足。由于 WSN 节点可以通过式(1)直接获取锚节点的信号强度,且采取式(2)可便捷计算出与锚节点的距离,因此在本文算法中,主要是通过拉格朗日插值方式进行精度修正。

首先,按图 2 所示的覆盖方法所获取的 WSN 节点坐标均为一次性坐标,即下一刻 WSN 节点坐标可能随着自身运动进入新的覆盖区域。由于典型的移动无线传感网节点均处于低速状态,移动速率一般不超过 4 Mb/s,且覆盖半径一般不低于 50 m^[13],因此可设在 3 s 范围内节点均将处于图 2 所示的覆盖区域内。

假设节点在 t 时刻对应的坐标为 (X_k, Y_k) ,拉格朗日插值函数 $L(k)$ 对应 k 时刻的取值。本文算法根据拉格朗日插值函数 $L(k)$ 并通过获取最近时刻的节点坐标进行拉格朗日预测,以便获得 $k+1$ 时刻的精确位置,具体如下^[14]:

$$X_k = L(t) = L_1 X_{k-1} + L_2 X_{k-2} \quad (8)$$

$$L_1 X_{k-1} = \sum_{i=k-3}^k L(i) (t - t_{k-i}) \quad (9)$$

$$L_2 X_{k-1} = \prod_{i=k-3}^k L(i) (t - t_{k-i}) \quad (10)$$

$$L(i) = \frac{\sum_{k=0}^i [L(k-2) - L(k-3)]}{\sum_{k=0}^i (t_k - t_{k-1})} \quad (11)$$

采用式(8)~式(11)所示模型即可便捷地获取 k 时刻节点的横坐标 X_k ,并可通过相同方式获取节点的纵坐标 Y_k :

$$Y_k = F(t) = L_1 Y_{k-1} + L_2 Y_{k-2} \quad (12)$$

$$L_1 Y_{k-1} = \sum_{i=k-3}^k F(i) (t - t_{k-i}) \quad (13)$$

$$L_2 Y_{k-1} = \prod_{i=k-3}^k F(i) (t - t_{k-i}) \quad (14)$$

$$F(i) = \frac{\sum_{k=0}^i [F(k-2) - F(k-3)]}{\sum_{k=0}^i (t_k - t_{k-1})} \quad (15)$$

结合式(7)、式(11)可获取节点在 $k+1$ 时刻的移动速度矢量 (v_x, v_y) , 获取方式如下:

$$v_x = \frac{X_k - X_{k-1}}{\Delta t} \quad (16)$$

$$v_y = \frac{Y_k - Y_{k-1}}{\Delta t} \quad (17)$$

通过式(15)、式(16)所示模型可精确获取节点在 $k+1$ 时刻的运动速率 V :

$$V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (18)$$

由于同一时刻网络中运动节点不唯一, 因此通过式(16)~式(17)可获取到 n 个节点全部的移动速度矢量及运动速率。对单一移动节点而言, 本文节点中最大运动速率为该节点的初始运动速率, 其绝对值为抽样区域, 如图4所示。节点在通过式(7)~式(14)所示模型精确获取自身移动速度矢量 (v_x, v_y) 及运动速率 V 后, 对抽样区域内存在的锚节点进行扫描, 并按式(3)~式(7)所示模型继续进行下一时刻的信号发射测距与覆盖定位过程。

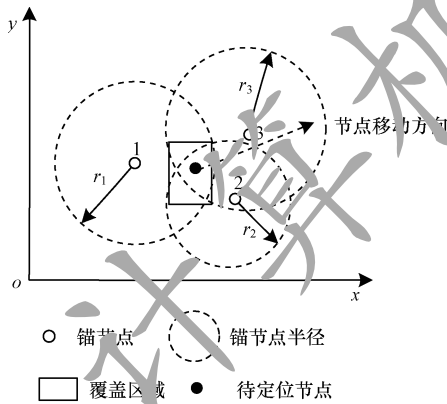


图4 抽样区域的确定

Fig. 4 Determination of sampling area

1.3 基于过滤机制的区域优化

不妨设任意2个抽样样本为 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) ; 按照节点1、节点2样本的横坐标与纵坐标划分正交区域, 引入随机正交机制^[15]进行正交覆盖, 覆盖操作见式(19)~式(21), 其中, (X_{test}, Y_{test}) 为第一步确定的抽样值, (X, Y) 为最终确定的抽样值, β, α 表示随机数, 取值为 $0 \sim 1$, 满足 $\alpha + \beta = 1$, 可通过式(13)所示的随机算法获取。正交区域内可获取多个样本值, 见节点3~节点6所处位置。

$$X_{test} = \beta X_1 + \alpha X_2 \quad (19)$$

$$Y_{test} = \beta Y_1 + \alpha Y_2 \quad (20)$$

$$X = \beta X_{test} + \alpha X_{test} \quad (21)$$

$$Y = \beta Y_{test} + \alpha Y_{test} \quad (22)$$

常规算法对节点在下一时刻的抽样区域采取随机分布机制, 即随机抽取节点在图5所示的抽样区域中任意位置作为下一时刻的坐标^[16], 具有简便的优势同时却降低了定位检测的精度。

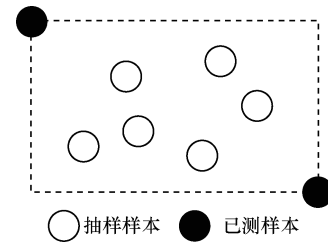


图5 正交覆盖示意图

Fig. 5 Orthogonal coverage schematic diagram

针对上述不足, 本文通过区域覆盖范围调整的方式优化覆盖范围, 优化方式如下:

$$N = \max(L, P(N)) \quad (23)$$

$$P(N) = L \frac{\pi d^2}{\mu} \quad (24)$$

其中, L 表示节点密度, d 可通过式(2)所示模型获取, μ 表示锚节点密度, N 是定位过程中选取的待测坐标个数。

确定定位过程中需要选取的待测坐标个数后, 为提高下一时刻节点选取的覆盖区域的定位质量, 本文设计如图6所示的过滤机制, 以排除错误坐标。

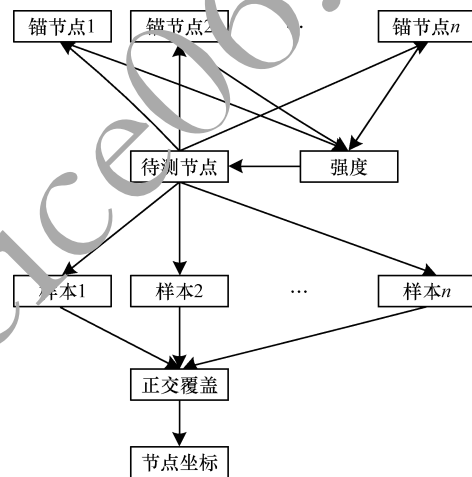


图6 基于过滤机制的区域优化过程

Fig. 6 Regional optimization process based on filtering mechanism

区域优化的具体步骤如下:

1) 从覆盖区域内按照式(1)模型的信号强度, 逐次获取 N 个锚节点的信号强度, 作为覆盖区域的锚节点基础样本。

2) 选取处于前三个信号强度最大锚节点的覆盖区域内的 n 个待测坐标, 作为待测坐标样本。

3) 从第2个步骤选取的 n 个待测坐标, 随机选取2个作为初始样本值, 并转步骤4进行正交覆盖, 获取最新的 n 个待测坐标。

4) 结合式(8)、式(15), 选取与基准位置最接近的坐标作为最终定位坐标, 算法结束。

2 实验结果与分析

本文仿真实验使用 NS2 仿真环境^[17-18],网络区域为矩形区域,大小为 1 024 m × 1 024 m;节点采取可控移动模式,即能够预设移动路径;节点覆盖半径不低于 64 m;节点移动速度不超过 4 m/s;锚节点个数为 100 个;其余节点个数为 50 个;节点信号采用 LTE-5G 制式信号,频率为 2.048 GHz。为突出本文算法的优势,选取超欧里几何区域自旋信号检测机制^[19](Detection Mechanism of Spin Signal in Hypereuclidean Geometry Region,2S-HGR)和拓扑漂移定位监测机制^[20](Topology Drift Location Monitoring Mechanism,TDLM)进行对比。

2.1 移动路径定位

预设节点移动路径如下:从坐标原点处移至(1 000 m,1 000 m),如图 7 所示。显然,在 2 种不同的节点运动速度下,本文算法预测路径均与实际路径较为吻合,2S-HGR 机制与 TDLM 机制存在较多的误预测情形,说明本文算法采取的运动轨迹捕捉方法具有优良的预测性能,且精度较高。2S-HGR 机制主要通过检测信号频率偏移的方式间接进行方位角定位,在复杂的网络条件下容易出现较多误报情形。TDLM 机制由于采用单纯的跳数机制进行轨迹捕捉,其精确度只能精确到节点一跳范围以内,因此定位检测的精度低于本文算法。

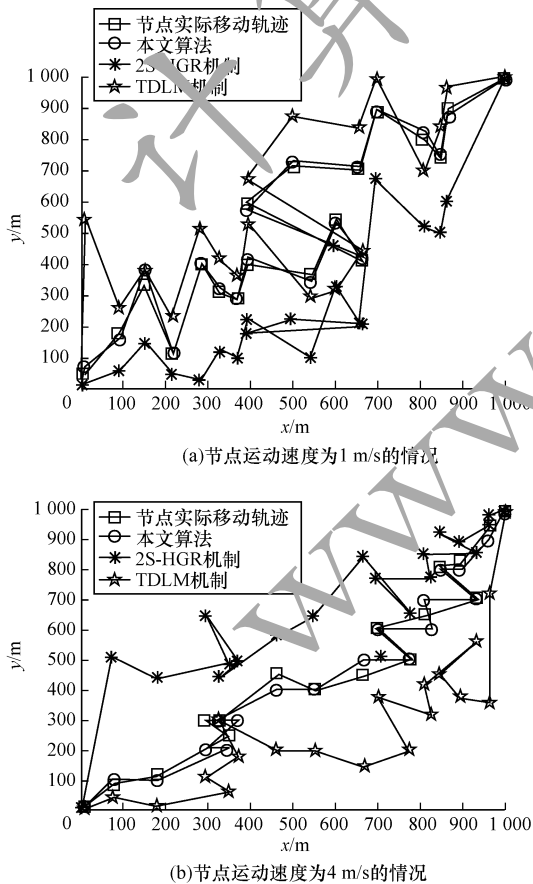


图 7 移动路径定位实验结果

Fig. 7 Experimental results of moving path location

2.2 定位误差测试

预设 100 个节点,运动速度均为 4 m/s,按照移动路径定位测试步骤逐秒进行定位误差捕捉,直到节点全部从坐标原点处移至(1 000 m,1 000 m),基准定位误差为 0,表示与节点实际移动轨迹之间的拓扑距离为 0。图 8 显示了 3 种不同算法的定位误差对比。显然,本文算法的定位误差要显著低于对比算法,与节点基准定位的匹配度较高。例如,当节点移动距离为 200 m 时,本文算法的预测轨迹与实际轨迹之间的误差(拓扑距离)为 -21.767 12 m,而 2S-HGR 机制和 TDLM 机制的预测轨迹与实际轨迹之间的拓扑距离分别为 102.340 55 m、-208.543 01 m。

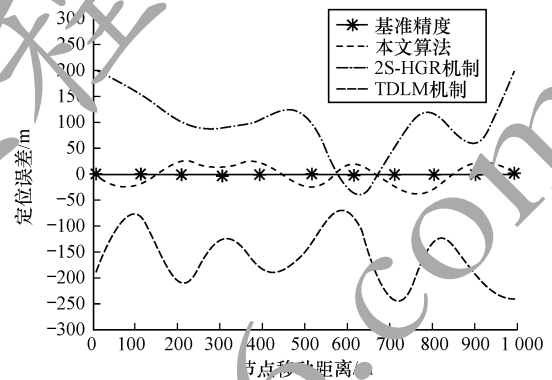


图 8 定位误差比较

Fig. 8 Positioning error comparison

为直观显示三者的定位误差,本文统计了 10 个位置的误差数据,结果见表 1。由表中数据可以发现,对于任意一个位置,本文算法的定位误差始终是最小的,最大定位误差仅为 -26.506 73 m,而 2S-HGR 机制、TDLM 机制的最大误差分别达到 154.300 76 m 和 -246.284 38 m。可见,本文算法的定位误差要显著低于对比算法,与节点基准定位的匹配度较高,说明本文算法采取的基于过滤机制的区域优化方法能够较好地降低定位误差,特别本文采用的正交覆盖方式可优化定位坐标在区域内的分布,有效防止因信道噪声的干扰而导致信号弱定位的情形,同时也说明本文算法采取的机制优于 2S-HGR 机制及 TDLM 机制中采用的信号频率偏移及跳数预测方式。

表 1 定位误差实验数据

Table 1 Experimental results of location error m

节点移动距离	本文算法	2S-HGR 机制	TDLM 机制
0	0.000 00	200.000 00	-200.000 00
100	-21.767 12	154.300 76	-81.451 14
200	21.767 12	102.340 55	-208.543 01
300	13.165 59	86.190 75	-123.229 96
400	24.575 78	102.340 55	-174.312 46
500	-23.698 07	94.616 73	-133.586 89
600	20.713 87	-37.916 91	-80.573 43
700	-24.751 32	52.135 75	-246.284 38
800	-26.506 73	115.506 14	-126.916 33
900	23.698 07	58.630 78	-198.010 53
1 000	0.000 00	200.000 00	-237.858 40

2.3 坐标定位精度

预设 20 个节点,运动速度均为 4 m/s,锚节点个数为 20,节点沿着锚节点运动,逐个捕捉节点坐标,并与本文算法、2S-HGR 机制及 TDLM 机制的定位精度进行对比,由图 9 可知本文算法坐标定位精度较高,与锚节点的距离均保持在 4 m 以内,存在离散的情况较少,且相当一部分节点的坐标与实际位置高度重合,说明本文算法通过信号发射测距与覆盖定位技术、基于拉格朗日插值方法的运动轨迹捕捉方法,以及基于过滤机制的区域优化方法,能够精确捕捉节点运动轨迹及坐标,这主要是由于本文算法能够对节点运动速度进行实时捕捉,完成捕捉过程后可使用正交覆盖的方式对获取的节点坐标进行精度提升,因此坐标精度较高,其较 2S-HGR 机制采取的频移检测方式及 TDLM 机制采取的跳数检测机制具有明显优势。

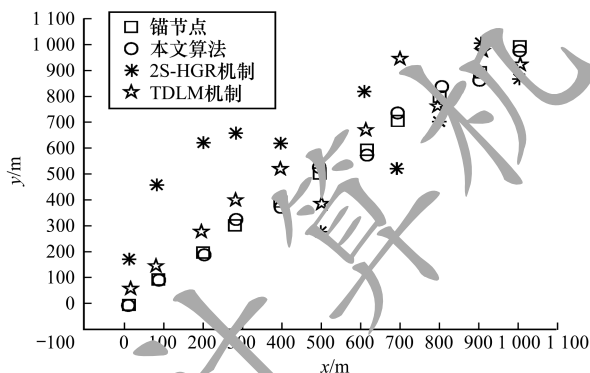


图 9 坐标定位结果比较

Fig. 9 Coordinate location result comparison

3 结束语

为提高移动 WSN 网络节点定位精度,本文提出一种基于运动轨迹捕捉与正交覆盖机制的节点定位算法,通过捕捉性能最优锚节点的方式应对拓扑结构变动时链路抖动的情况,实现对节点运动矢量及坐标的精确捕捉,动态获取节点运动轨迹。下一步将针对 WSN 网络节点定位过程中难以实时捕捉网络整体拓扑结构的问题,引入超欧里几何拓扑映射机制,并采用区域映射算法将复杂拓扑结构转化为平面拓扑结构,进一步提高本文算法对移动 WSN 的适应性。

参考文献

[1] WANG Yongwei. Study on WSN node localization algorithm based on signal strength ratio[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015. (in Chinese)
王永为. 基于信号强度比的 WSN 节点定位算法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.

[2] WU Liang, GU Chuan, LIU Guoying. Singal source precise localization algorithm for WSN based on orthogonal multiplexing cycle mechanism[J]. Computer Engineering, 2017, 43(11): 81-89. (in Chinese)
吴亮, 谷川, 刘国英. 基于正交复用循环机制的 WSN 信源精确定位算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(11): 81-89.

[3] BI Bin, WANG Jinyi, CHEN Wenliang, et al. A survey of network management in wireless sensor network[J]. Computer Systems & Applications, 2010, 19(12): 265-270. (in Chinese)
毕斌, 王金一, 陈文亮, 等. 无线传感器网络管理综述[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(12): 265-270.

[4] DINI F, YASSER G. A comprehensive wireless sensor network reliability metric for critical Internet of things applications [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017(1): 1-18.

[5] PETER R, JEROEN H, ELI D P. Smart container monitoring using custom-made WSN technology: from business case to prototype [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 1): 1-20.

[6] DEVESH P S, GOUDAR R H. Energy efficient clearance routing in WSN [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017, 8(2): 199-207.

[7] SLAVICA T, RADOŠ NOVIC I. Mapping application requirements to virtualization-enabled software defined WSN [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 97(2): 1693-1709.

[8] PRAMOD K, ASHVINI C. Spatial-temporal aspects interated probabilistic intervals models of query generation and sink attributes for energy efficient WSN [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 95(2): 1849-1870.

[9] LINDA F M, LAURIE L. Interference aware bandwidth estimation for load balancing in EMHR-energy based with mobility concerns hybrid routing protocol for VANET-WSN communication [J]. Ad Hoc Networks, 2017, 66: 1-15.

[10] TAREK G, SARAH A. Trust-based secure clustering in WSN-based intelligent transportation systems [J]. Computer Networks, 2018, 9(15): 1047-1066.

[11] JEAN M E, ANDRÉ F. DACYCLEM: a decentralized algorithm for maximizing coverage and lifetime in a mobile wireless sensor network [J]. Ad Hoc Networks, 2018, 87: 174-187.

[12] RADOŚLAW O S, MARCIN G. The channel for hidden data transmission in WSN [J]. International Journal of Electronics and Telecommunication, 2017, 63(2): 209-216.

[13] GOURAV V, VIDUSHI S. Efficient RF energy harvesting circuit design for WSN and IoT application [J]. International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control, 2018, 8(1): 37-46.

(上接第 162 页)

- [14] JOANA M, MARGARIDA S. Lagrangian mixing simulation and quantification of scales [J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 2(12):199-210.
- [15] MOUSA Y. Analysis and design of colpits oscillator for short-range WSN [J]. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2016, 62(3):279-282.
- [16] ZHANG Degan, SONG Xiaodong, WANG Xiang. Extended AODV routing method based on Distributed Minimum Transmission (DMT) for WSN [J]. *AEUE-International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(1):371-381.
- [17] HU Yanping. Research on congestion control based on Ad Hoc network MAC layer rate adaptive protocol [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- 朱燕苹. 基于 Ad Hoc 网络 MAC 层速率自适应协议的拥塞控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [18] PRAKASH A, YADAVR K, GUPTA D. Sensor node deployment based on OTLBO in WSN [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 57(2):988-995.
- [19] ANSAR H, NOOR M S. Bandwidth utilization efficiency enhancement for OFDM-based WSN [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(15):3776-3789.
- [20] AHMED F, TAMBERG G. Dual-source Linear Energy Prediction (LINE-P) model in the context of WSNs [J]. *Sensors*, 2017, 17(7):1162-1178.

编辑 金胡考