

信标节点漂移情况下的无线传感器网络节点定位机制

赵小敏, 张海洋, 金言, 陈庆章

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对信标节点漂移情况下的节点定位问题, 提出了一种分布式的信标节点漂移检测方法, 采用节点自评和协商机制, 自动寻找可能发生了漂移的信标节点, 同时针对大量信标节点发生漂移后的定位覆盖率下降问题, 构建普通节点的定位可信度模型, 并在定位盲区内使用一些较为可靠的普通节点作为临时信标节点进行定位。仿真实验表明, 该算法在误检测、定位误差方面性能优于传统算法, 具有较低的通信开销、较高的实用性和灵活性。

关键词: 无线传感器网络; 节点定位; 信标节点漂移; 定位盲区

中图分类号: TP311

文献标识码: A

Node localization scheme in wireless sensor networks under beacon drifting scenes

ZHAO Xiao-min, ZHANG Hai-yang, JIN Yan, CHEN Qing-zhang

(Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Due to the accidentally position change of the beacons in wireless sensor networks, a distributed detecting mechanism of drifting beacon nodes is introduced based on self-scoring and consultation, therefore the drifting beacon nodes can be detected automatically. After studying the current node localization methods, an improved localization method is introduced against the localization coverage decreasing situation caused by beacon nodes drifting. A credibility model of the normal node localization method is built, and it is used as a basis to upgrade normal nodes as temporary beacon nodes in localization blind areas. Simulation results show that the performance of this algorithm is superior to other traditional algorithms in error detection rate, positioning error and communication cost aspects, and this algorithm has higher practicability and flexibility.

Key words: wireless sensor network; node localization; drifting beacon node; localization blind area

1 引言

1.1 无线传感器网络定位技术

无线传感器网络(WSN, wireless sensor networks)是物联网技术的一个重要组成部分, 它利用大量部署在待监测区域的微型传感器节点, 通过无线通信方式构成一个自组织的多跳网络^[1], 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内待测对象的信息并将其发送给观察者, 此外, 无线传感器网络还可广泛应用于土木工程和可持续能源系统等领域中^[2,3]。

在实际应用中, 由于无线传感器网络系统的节点数目通常十分庞大, 且节点可能是随机部署的, 无法在部署时逐一测量每个节点的位置。而节点的位置对于监测信息的获取又是至关重要的。目前广泛使用的全球定位系统(GPS, global positioning system), 其能耗和成本都较高, 难以给每个传感器节点都配备, 并且 GPS 无法在建筑物内部使用。因此通常采用间接测量的方式来获取未知节点的位置。

根据是否配备位置已知的信标节点, 无线传感器网络定位算法可以分为基于信标节点的定位算法^[4-6]和无信标节点的定位算法^[7-9]2类。其中, 基

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2013-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61379023); 浙江省自然科学基金资助项目(LY12F02036)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61379023); The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY12F02036)

于信标节点的定位算法在绝对精度和相对精度上都有更好的表现。因此，在对节点位置精确度要求较高的应用场合中通常使用基于信标节点的定位算法。

1.2 信标节点漂移问题

不考虑使用动态位置进行定位的无线传感器网络^[10,11]，在传统的静态无线传感器网络中，一般假定所有节点都是静止不动的，然而实际应用中节点的位置并不像理想情况下那样保持不变。由于存在各种不确定的自然因素和人为因素，无线传感器网络中的任何节点都有可能发生意外的移动，称这种意外的移动为“漂移”。对于一般的情况，以周期方式对节点进行重定位就可以校正由漂移引起的定位偏差。为了降低成本，大量应用中采用了对信标节点人为预设位置的方法，这种情况下如果信标节点发生了漂移，重定位过程可能会使位置偏差进一步扩散。即使信标节点携带 GPS 模块，也可能因信标节点的漂移使某个区域内定位覆盖率降低，从而导致普通节点无法进行重定位。因此，解决信标节点漂移情况下的无线传感器网络节点定位问题，具有极大的理论价值和应用价值。

可以把上述问题分解成 3 个子问题：1) 信标节点的漂移检测，即先确定信标节点是否发生了漂移；2) 如果信标节点发生了漂移，如何对其进行重定位；3) 信标节点的漂移可能会导致定位覆盖率下降，在这种情况下，如何对其他节点进行定位。通过分析可知，后 2 个子问题具有相同的本质，可以采用提升位置可信度高的普通节点为信标节点的方法解决。

1.3 研究现状

针对信标节点漂移检测问题，Kuo 等人提出了信标节点移动检测算法(BMD, beacon movement detection)^[12,13]，主要研究网络中有部分信标节点发生了位置变化而未被发现的情况，探讨如何自动地检测这种位置变化，以及识别这些移动了的信标节点。其基本思想为，在网络中设置一个 BMD 引擎来收集全网络的 RSSI (received signal strength indication) 信息并进行处理。该方法在一定容错范围内能够判断出信标节点的移动。

BMD 模型本质上是一个集中式的求解 NP 完全问题的算法，而求解 NP 完全问题的启发式算法存在运算速度和运算结果精确度之间的矛盾，且集中式的计算模式，产生较大的通信开销。

目前，在信标节点漂移情况下的节点重定位方面的直接研究较少，而提升位置可信度高的节点为临时信标节点的机制中，重点是对位置可信度的描述。文献[14,15]利用图论中的稳定四边形模型建立了基于邻居节点几何分布的定位可信度模型；Yang^[16]等人采用概率模型来描述定位可信度，模型的建立依据以定位点为圆心的圆形区域覆盖概率；文献[17]提出根据无线电传播特性并结合独立观测数据最佳线性融合研究的结论来描述定位可信度，其定位可信度仅与它周围基站的数目以及它与待定位点之间的距离有关。以上研究为利用可信度模型判断节点位置的可靠性提供了借鉴。

本文采用节点自评分和协商机制进行信标节点的漂移检测，同时还进一步讨论了此后的节点重定位问题，以解决信标节点漂移情况下，可能出现的定位不准确问题。本文的主要贡献在于：1) 提出一种分布式节点漂移检测算法，并通过实验分析了迭代次数对算法性能的影响；2) 采用概率模型来判断节点的定位可信度，并通过基于可信度的节点选举，提升普通节点为临时信标节点，完成节点重定位。

2 信标节点漂移检测方法

2.1 问题描述

信标节点漂移引起的节点定位问题于 1.2 节进行了概括。分析可知，一个节点位置的可靠性可以用它与周围节点的 RSSI 变化程度来进行描述，变化越剧烈，则它与周围节点的相对运动越剧烈，它越有可能是一个漂移节点。

但是，RSSI 测距方法并不是一种精确、可靠的方法，得到的测量值可信度并不高，甚至在很多情况下是不可用的，在这个过程中可能产生结果和实际情况的偏差，称其为第一类误检测情况。

其次，在理想的 RSSI 测量无误差的情况下，可以通过某节点与其所有邻居节点的 RSSI 值的变化来判断该节点的位置是否发生改变，但是由于 RSSI 值的变化是由相对运动造成的，无法判断具体是哪个节点发生了移动，这就造成了多义性，称其为第二类误检测情况。

2.2 算法描述

根据 2.1 节中的问题，本文提出了一种基于评分和协商机制的分布式信标节点漂移检测算法，不同于以往的集中式算法，该分布式算法中每个节点通过自评分以及与周围节点的协商来判断自身是

否发生漂移。该算法的基本思路可以表示如下。

1) 每个节点根据节点评分机制对自身进行评分以衡量自身发生漂移的可能性, 并得到一个初始评分;

2) 节点通过与周围节点的协商, 将可能造成误检测的邻居节点排除, 重新计算得分, 并再次协商;

3) 经过有效且复杂度合理的协商过程之后, 得到一个最终的得分结果, 如果得分高于阈值, 则标记为漂移信标节点, 否则标记为未漂移信标节点。

2.2.1 节点评分机制

本文采用基于 RSSI 变化的信标节点漂移评分机制。节点当前位置可靠性的评分标准主要体现在 2 个方面: 1) 它的一跳邻居节点中 RSSI 没有显著变化的节点越多, 其可靠性就越高; 2) 它的一跳邻居节点中 RSSI 变化的节点越多, 变化程度越大, 其可靠性就越低。

设网络中节点个数为 n , 节点通信灵敏度 s 为能观测到的最低信号强度。首先, 在组网时每个信标节点检测自己与一跳邻居间的 RSSI, 生成 RSSI 行向量 \mathbf{P}_{i0} , 其中 i 和 j 分别为某一信标节点及其邻居节点的编号。

$$P_{i0j} = \begin{cases} \text{RSSI}_{ij}, & \text{single-hop} \\ s, & \text{其他}(0 < j \leq n) \end{cases} \quad (1)$$

t 时刻, 信标节点再次进行自检, 记录与原一跳邻居间的 RSSI 行向量为 \mathbf{P}_{it} , 记录方法同上, 计算得到 RSSI 变化向量 \mathbf{P}_{ic} 和 RSSI 未变化向量 \mathbf{P}_{is} 。

$$P_{icj} = \begin{cases} 1, & |P_{itj} - P_{i0j}| > \delta \\ 0, & \text{其他}(0 < j \leq n) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{isj} = \begin{cases} 1, & |P_{itj} - P_{i0j}| \leq \delta \text{ 且 } (P_{itj} \neq s \text{ 或 } P_{i0j} \neq s) \\ 0, & \text{其他}(0 < j \leq n) \end{cases}$$

其中, P_{icj} 和 P_{isj} 分别为 \mathbf{P}_{ic} 和 \mathbf{P}_{is} 的元素, \mathbf{P}_{ic} 中 1 的含义为 t 时刻 RSSI 变化超过给定阈值 δ 的节点, 而 \mathbf{P}_{is} 中 1 的含义为该信标节点与原一跳邻居以及新增加的(信号强度较低, 0 时刻没有被观察到)一跳邻居中 RSSI 变化不大于阈值的节点。记 \mathbf{P}_{ic} 中 1 的个数为 n_{ic} , \mathbf{P}_{is} 中 1 的个数为 n_{is} , 每个节点的得分为 Sr_i , 计算方法为

$$Sr_i = (\mathbf{P}_{i0} - \mathbf{P}_{it})\mathbf{P}_{ic}^T - kn_{is} \quad (3)$$

其中, k 为加权值, 如果 Sr_i 大于阈值 δ , 则判定信标节点可能发生了漂移。 k 值以及阈值 δ 的取值将在下文中进行讨论。

2.2.2 得分协商机制

以上的评分方法是对于单个节点而言的, 评分结果和周围节点的漂移情况有关, 它周围节点漂移情况越严重, 评分的结果就越不准确。因此, 必须进行节点间的协商, 以减小周围节点漂移对评分结果造成的影响, 协商机制如下。

1) 如果节点自身得分高于预设的阈值 δ , 那么先假设节点自身发生了漂移, 并发出协商请求;

2) 得到周围邻居节点的得分后, 将邻居节点中同样判定为自身发生漂移的节点从得分计算中去除, 然后再次计算得分, 如果再次计算得到的得分小于阈值, 就将该消息广播告知周围节点。周围节点再根据该结果修正其自身的得分。这样的迭代过程可以进行多次, 由于第二类误检测情况是客观存在的, 迭代次数的增加不一定导致更好的结果, 具体的迭代次数选择将在下文的实验中进行讨论。

2.2.3 算法参数的确定

1) 阈值 δ 的确定

对阈值 δ 的要求为, 在有噪声但距离不变的情况下基本不会发生误检测, 同时又能够反映节点的相对移动。根据该目标, 分析距离固定情况下的 RSSI 噪声, 假设信道为理想的高斯白噪声信道^[18], 按照 RSSI 的经典衰减公式^[19]进行测距。

$$P = P_0 - 10n_p \lg(d/d_0) \quad (4)$$

其中, P 、 P_0 分别对应距离为 d 、 d_0 时的 RSSI 值, n_p 为路径衰减因子。此时 RSSI 就符合以实际值为期望, σ 为标准差的正态分布 ($P \sim N(P_0 - 10n_p \lg(d/d_0), \sigma^2)$), 如图 1 所示。

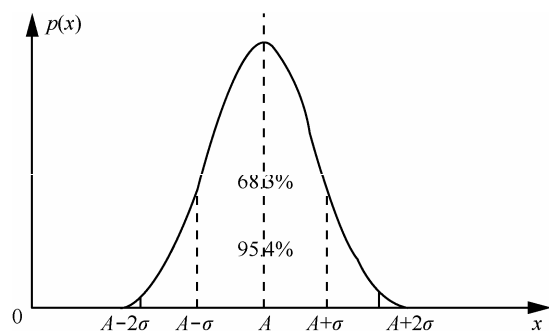


图 1 RSSI 值概率密度分布

取置信区间为 95.4%, 设定 RSSI 变化阈值为 $\delta=2\sigma$, 即如果没有节点发生漂移, 95.4% 的情况下 RSSI 噪声造成的 RSSI 差值不会超过这个阈值。对于不同的网络, 可以通过经验值或实际测量得到

RSSI 差值来对 δ 进行设置。

2) 未移动节点权值 k 的确定

根据以上评分标准的设计目标, 应该在难以判定信标节点是否发生漂移的情况下, 使得分能够控制在阈值附近。按照式(3)的得分计算方法, 当漂移节点和未漂移节点数量相同时, 使得分为 0, 则 k 的值应该等于 $P_{i0}-P_{ii}$ 的期望值, 此处设定为接收灵敏度绝对值的 1/3。

2.2.4 算法流程

1) 首先, 在组网初期, 通过自检得到与一跳邻居间的 RSSI, 生成 RSSI 行向量 P_{i0} 。

2) 在组网完成后, 每隔一段时间信标节点会再次进行自检, 记录与原一跳邻居间的 RSSI 行向量 P_{ii} , 如果存在原一跳邻居节点无法再观测到, 则将其设定为接收灵敏度 s 。通过观测结果, 计算得到 RSSI 变化向量 P_{ic} 和 RSSI 未变化向量 P_{is} 。

3) 如果节点 i 被预归类为漂移节点, 则节点 i 开始向周围的一跳邻居节点进行广播, 说明自己为漂移节点, 所有其一跳邻居 j 接收到该数据分组后将 i 排除出 P_{ic} 和 P_{is} 集合, 所有节点各自重新计算得分, 本次迭代结束以后进行下一次迭代, 迭代过程可以重复进行。

3 漂移节点的位置更新方法

3.1 问题描述与分析

随着时间的推移, 无线传感器网络当中发生漂移的信标节点会越来越多, 可使用的信标节点数量将会越来越少, 这会在很大程度上影响节点定位的精确度。在这种情况下, 研究信标节点密度逐渐减小场景下的定位算法变得十分重要。根据前面的描述, 将算法分为 4 个主要步骤。

1) 使用信标节点漂移检测方法判断普通节点的漂移情况, 若判定为未漂移节点, 则使用原有位置, 否则对其位置进行更新;

2) 建立节点定位可信度模型, 计算现有可定位节点的定位可信度, 未漂移节点沿用上一轮计算得到的定位可信度;

3) 根据上 2 步得到的定位可信度将可信度较高的普通节点提升为临时信标节点, 以改善定位精度;

4) 使用现有的定位算法对目标节点进行定位。

3.2 算法描述

3.2.1 漂移节点定位可信度描述模型

本文提出了一种衡量普通节点定位可信度的

矢量模型, 用以选择可信度较高的普通节点, 使用概率密度模型对定位过程进行详细的分析和建模, 对于某一个节点, 其定位可信度可以由周围节点的定位可信度及其与周围节点的几何关系进行描述。通常使用概率模型来对 RSSI 的测距结果进行描述, 因此定位可信度也可以使用概率模型来进行建模。按照式(4)的 RSSI 经典衰减公式进行测距。则当测得距离为 d_0 时, 其实际距离值的概率密度函数^[20]经推算为

$$f(d) = \frac{10n_p}{\ln 10 d \sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(10n_p \ln(\frac{d_0}{d}))^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

即当 RSSI 测量值服从正态分布时, 对应的距离测量值服从对数正态分布。大多数使用 RSSI 来进行节点定位的方法, 其原理都可以用三边定位来描述, 以下用概率密度模型对三边定位的可靠性进行分析。对于一个未知节点, 已知 3 个信标节点的位置以及三者到未知节点的距离 d_i , 那么未知节点的位置概率分布可以表示为

$$P(d_1, d_2, d_3) = \frac{\prod_{i=1}^3 f(d_i)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \prod_{i=1}^3 f(d_i) dx dy} \quad (6)$$

其中, $d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$, x_i 和 y_i 为信标节点的坐标。根据式(6)可以得到平面上未知节点位置的概率分布。

该模型可以较准确地对定位的可信度进行描述。总地来说, 概率分布越集中, 定位可信度越高, 分布越分散, 定位可信度越低。但由于该方法计算量较大, 难以在无线传感器网络节点上进行实现, 以下使用近似方法对其进行处理。

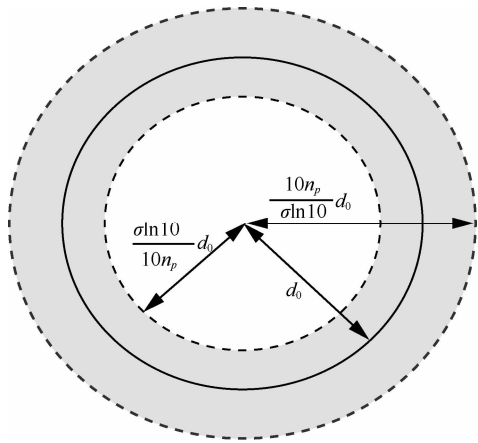
使用置信区间模型来对概率模型进行近似。对于式(5)的 RSSI 概率密度模型, 根据对数正态分布的性质,

可以求得其 95% 置信区间为 $(-\frac{\sigma \ln 10}{10n_p} + \frac{10n_p}{\sigma \ln 10})d_0$, 如

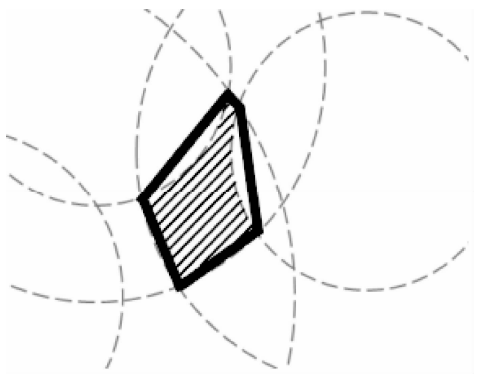
图 2(a) 所示。根据该近似方案, 对节点定位的结果也可以描述为一个近似的置信区间, 表示为 3 个信标节点测距置信区间的交集。为了简化计算, 构建以三者置信区间交点为顶点的凸多边形, 如图 2(b) 所示。

1) 偏心率

用 3 个特征量来描述凸多边形。



(a) 测距置信区间示意



(b) 置信区间简化示意

图2 三边定位位置测量置信区间示意

将偏心度 B 定义为预定位位置与置信区间质心的距离除以多边形顶点最长连线的长度。如图 3(a) 所示, 偏心度 $B=d_2/d_1$, 图中的十字和圆圈分别代表定位位置和多边形所有顶点坐标的平均值。偏心度越大, 则发生翻转歧义^[15] (因测距误差的存在, 实际的测量位置不会是唯一, 定位精度无法得到保证)的可能性越大。

2) 面积 S

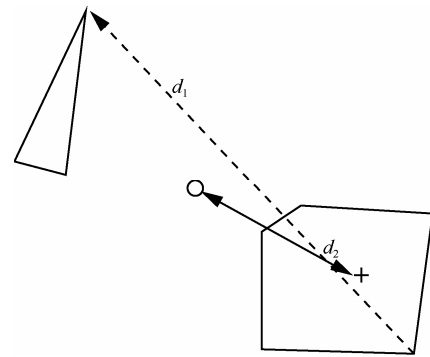
凸多边形的面积越小, 代表其置信范围越小, 定位越可靠。

3) 离心度、离心角

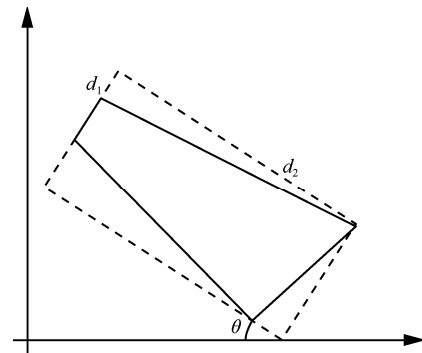
绘制置信多边形的最小外接矩形。如图 3(b) 所示, 离心度 $L=d_2/d_1$, 离心度越接近 1, 置信区间就越接近各向同性, 如果各向异性明显, 就需要考虑其离心角以确定其各向异性对定位的影响。离心角 LA 定义为多边形最小外接矩形的长边与坐标系 x 轴的夹角 θ 。在置信区间面积大小确定的情况下, 离心度越大, 定位越不准确。

3.2.2 临时信标节点推举机制

建立了普通节点定位可信度模型之后, 就可以



(a) 偏心度



(b) 离心度、离心角

图3 偏心度、离心度、离心角示意

依据该模型提升一些可信度较高的普通节点作为临时信标节点。具体过程如下。

1) 将未漂移节点标记为已定位, 并将本轮需要且能够重新定位的节点进行定位。

2) 上一步中标记为已定位的节点, 计算其置信区间的特征值, 即偏心度、面积、离心度、离心角。

3) 通过偏心度阈值 BT 过滤掉定位位置距置信区间中心位置较远的节点, 即翻转歧义的情况。

4) 根据面积阈值一 (ST_1) 过滤掉面积过大的节点, 根据面积阈值二 (ST_2) 将剩余的节点分为 2 类, 面积小于 ST_2 的节点直接提升为临时信标节点, 面积大于 ST_2 但小于 ST_1 且离心度小于离心度阈值 LT 的节点提升为备用信标节点。

5) 进行其他节点的定位, 此处其他节点的含义为没有参与第一轮定位的节点以及第一轮定位中无法被定位的节点, 定位机制暂定如下。

①如果周围未漂移信标节点数目大于等于 3, 则仅选用信标节点参与定位。

②如果周围未漂移信标节点数目小于 3, 则临时信标节点也参与定位。

③如果周围未漂移信标节点以及临时信标节

点数目之和小于 3，则备用信标节点也参与定位。

④如果仍无法定位，则标记为无法定位。

根据以上的机制对信标节点集进行处理，并采用传统最大似然估计法进行定位。

4 实验和仿真

仿真环境为在 $L \times L$ 的正方形范围内，随机部署 N 个信标节点(2 个节点之间的距离不小于 5 m)，某时间段内有 M 个节点发生了半径为 D 的圆形范围内的随机漂移，RSSI 服从以实际值为期望，标准差为 σ 的正态分布，设定节点通信距离为 20 m。

4.1 迭代次数选择

由于分布式算法在运行过程中随机性较强，对其进行直接的建模比较困难，因此本算法通过仿真实验选择迭代次数。仿真环境中 L 取 100 m，信标节点数目 N 取 50， D 分别取 20 m 和 40 m， M 从 1 到 25 变化， M 在每种情况下进行 30 次循环求平均

值， σ 取 2。下面为迭代次数选择的仿真实验。

1) 不进行迭代

如图 4 所示，在不进行迭代的情况下，检测的成功率较高，但是随着 M 的增大，错误率逐渐增大，当 $D=40$ 时，最高可达 50%左右。不进行迭代是以发现尽可能多的可疑信标节点为目的，这样势必会增大错误率。

2) 一次迭代

如图 5 所示，进行一次迭代后，成功率有所降低，但是错误率有明显下降。

3) 二次迭代

如图 6 所示，进行二次迭代和进行一次迭代的实验结果并无显著差异。

从 3 次仿真的结果中可以看出，不进行迭代时，错误率较高。但是在实际的仿真中通过对更多的迭代次数进行对比发现，增加迭代次数对结果的影响并不大，而且增加迭代次数会增大算法实现的困难度和加重网络负担，因此选择迭代次数为 1。

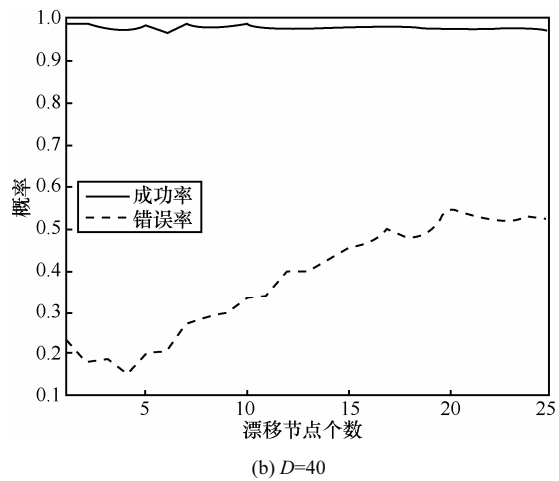
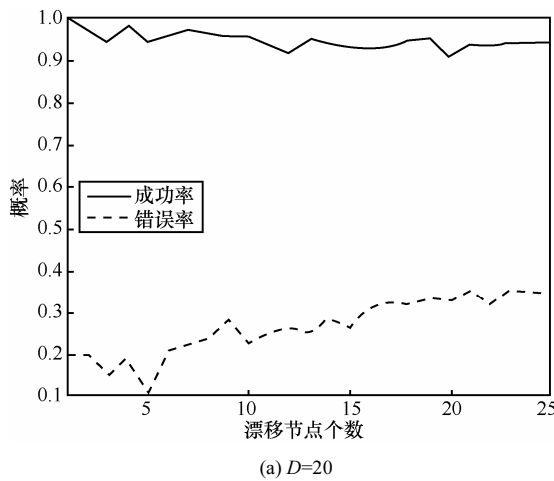


图 4 不进行迭代

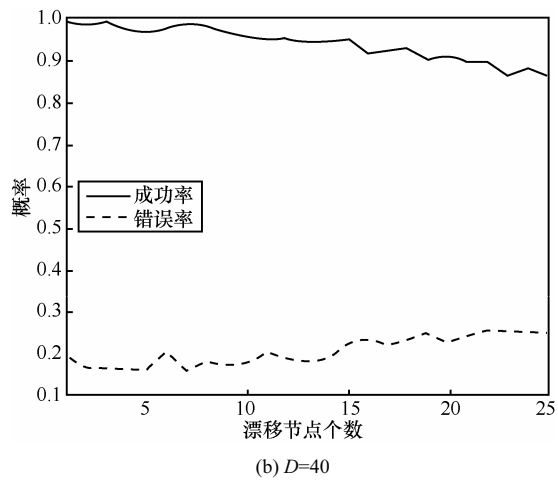
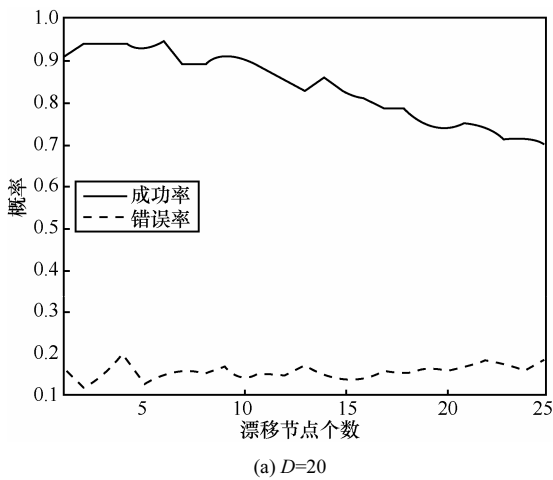
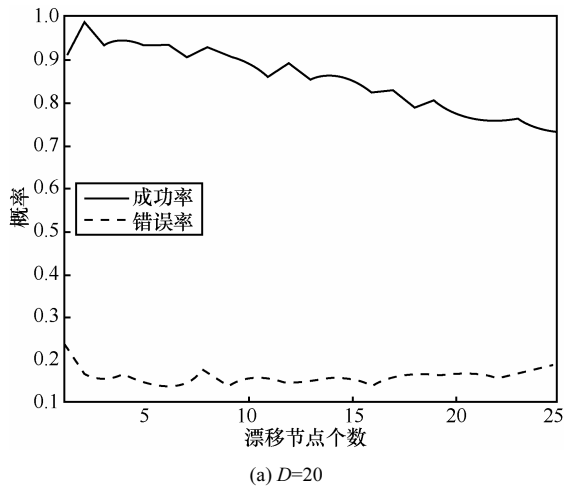
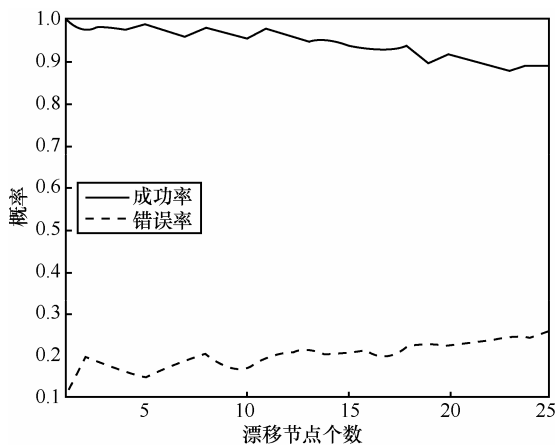


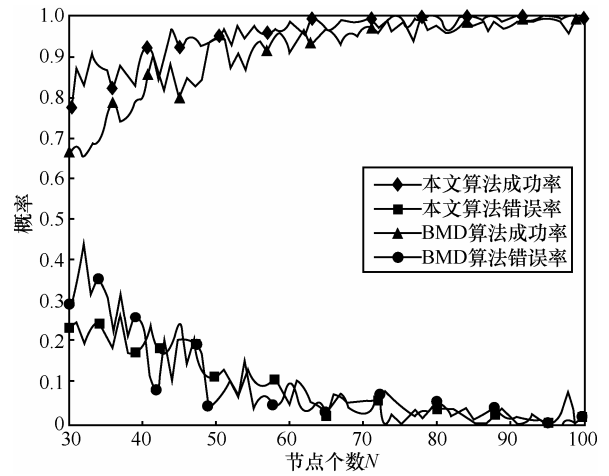
图 5 一次迭代计算



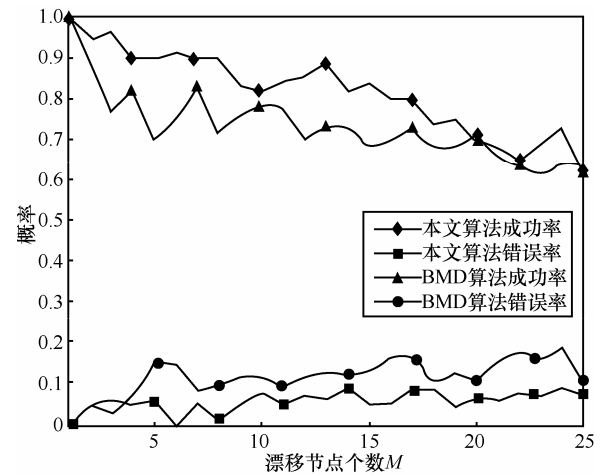
(a) $D=20$



(b) $D=40$
图 6 二次迭代计算



(a) 情况 1



(b) 情况 2
图 7 算法性能比较

4.2 漂移检测算法仿真实验

4.2.1 算法性能分析

用来衡量漂移检测算法性能的 2 个指标为：成功率 $((B_{MD} \cap B_M)/B_M)$ ；错误率 $((B_{MD} \cap C_U B_M)/B_M)$ 。其中， B_M 表示实际发生了漂移的节点集合， B_{MD} 为判断为漂移节点的集合， U 为所有节点的集合。成功率为被正确判断为漂移节点的数目与实际漂移节点数目的比值，用以衡量算法能够成功找到漂移节点的概率；而错误率是错误判断为漂移节点的数目与实际漂移节点数目的比值，用以衡量算法在检测漂移节点时产生误判的概率。

将本文提出的漂移检测算法与 BMD 算法进行比较。在实际应用中，采用穷举法进行最优解的求解是不现实的，而文献[12,13]中也没有提出网络规模较大时的具体解法，本文采用贪婪算法求次优解，并对其进行验证。图 7 为 BMD 算法和本文提出的漂移检测算法的效果比较。

如图 7(a)所示， $L=100\text{ m}$ ， $M=15$ ， N 从 30 变化到 100， $D=40$ ， $\sigma=2$ ，发生漂移的信标节点个数相同，网络密度不同的情况下，本文算法和 BMD 算法进行漂移信标检测的实验结果。本文算法在成功率和错误率上都有更好的表现。

如图 7(b)所示， $L=100\text{ m}$ ， $N=50$ ， M 从 1 变化到 25，其他条件不变的情况，可以看到本文提出的算法比 BMD 算法在成功率和错误率上有更好的表现。

4.2.2 算法通信量分析

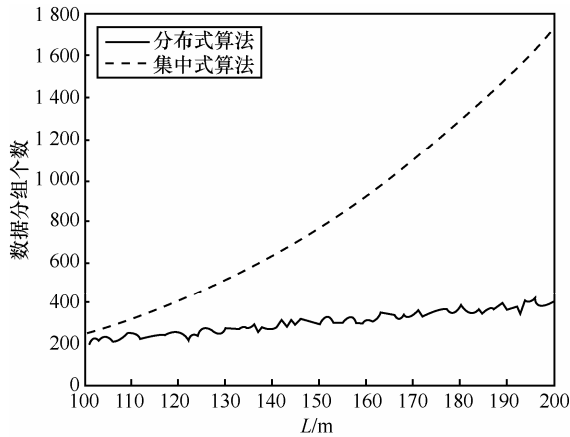
制约无线传感器网络生命周期的最大因素就是能耗，而对于一个设计完备的无线传感器网络节点来说，其能耗最主要的方面就是通信。集中式算法需要将每个节点的信息发送至汇聚节点，而分布式算法只需要与相邻节点交换信息。以下对不同情况下通信量的情况进行了实验分析。

图 8 为 L 从 100 m 到 200 m 变化， N 与 L^2 成正比以使网络密度基本保持不变， M 取不同值时 2 种

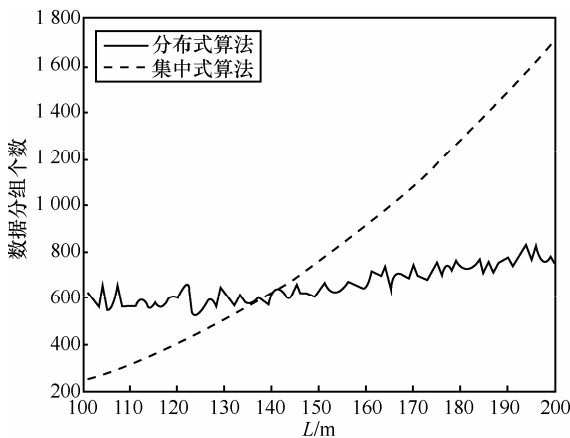
算法通信量的仿真结果。集中式算法的数据分组个数 cnt 的计算方法为

$$cnt = 2 \sum_{i=1}^N \text{ceil} \left(\frac{d_i}{d} \right) \quad (7)$$

其中, d_i 为该节点到网络中心的距离, d 为最大通信半径, 函数 ceil 的作用为向正方向舍入取整。式 (7) 的意义为网络中每个节点发送数据分组到网络中心所需理想跳数之和的 2 倍 (发送信息和接收应答)。



(a) $L^2/N=200, M=5$



(b) $L^2/N=200, M=10$
图 8 算法通信量比较

从仿真结果可以看出, 随着网络规模的增大, 分布式的漂移检测算法发送的数据分组个数总体呈近线性缓慢增长, 而集中式算法发送的数据分组数目呈非线性快速增长。即网络规模越大, 分布式算法在通信量方面的优势越明显。

4.3 重定位方法仿真实验

仿真实验有 3 个对照组。

1) 不进行漂移信标节点检测, 直接使用文献 [21] 中的最大似然估计法进行定位, 即可能使用了

错误的信标节点位置对目标节点进行定位, 简称为传统定位方法。

2) 进行漂移信标节点检测, 并将漂移信标节点从信标集合中排除, 简称为丢弃漂移信标节点法。

3) 进行漂移信标节点检测, 将判断为发生漂移的信标节点降级为普通节点, 将所有可定位的普通节点当作临时信标节点使用, 简称为普通节点提升法。

仿真环境为 $L=100 \text{ m}$, 信标节点数目 $N=50$, 普通节点数目为 100 个, $D=40$, M 从 1 到 25 变化, 每个 M 值下进行 30 次循环求平均值, $\sigma=2$ 。

以下设定了 2 个用来进行性能分析的特征量。

1) 定位覆盖率: 网络中能被定位的节点数目和总节点数目的比例。

2) 定位误差率: 对于可定位节点, 定位误差率定义为定位误差距离除以通信半径, 对于不可定位节点, 定位误差率为 1, 总的定位误差率为所有节点定位误差率的平均值。

图 9 为几种算法的性能比较, 从图中可以看出, 在定位覆盖率方面, 使用普通节点提升算法的定位覆盖率最高; 本文使用的算法择优选择普通节点作为临时信标节点而且只允许一次误差传递, 因此定位覆盖率略低; 传统算法和丢弃信标节点法的定位覆盖率下降比较明显。

定位误差率方面, 传统算法的定位误差率最大; 使用丢弃漂移节点算法误差率增大的原因, 来自于某些区域的可用信标节点减少而造成的定位覆盖率下降; 因为某些被提升为临时信标节点的普通节点本身定位误差较大, 容易发生误差的多次传递, 最终导致普通节点提升法的误差率也较大; 本文算法考虑了误差传递的限制, 因而能够得到较好的效果。

5 结束语

针对信标节点漂移引起的无线传感器网络节点定位问题, 本文提出了一种基于协商评分机制的信标节点漂移检测算法, 该算法的分布式计算特性降低了网络通信开销和节点能耗。此外, 提出了基于概率分布模型的定位可信度模型, 并简化了模型的计算过程, 提高了实用性。通过实验分析, 本文提出的漂移信标节点检测算法和节点重定位机制具有可行性, 且性能较其他算法有一定程度的提高。下一步的工作是引入辅助算法进一步提高漂移检测的准确率。

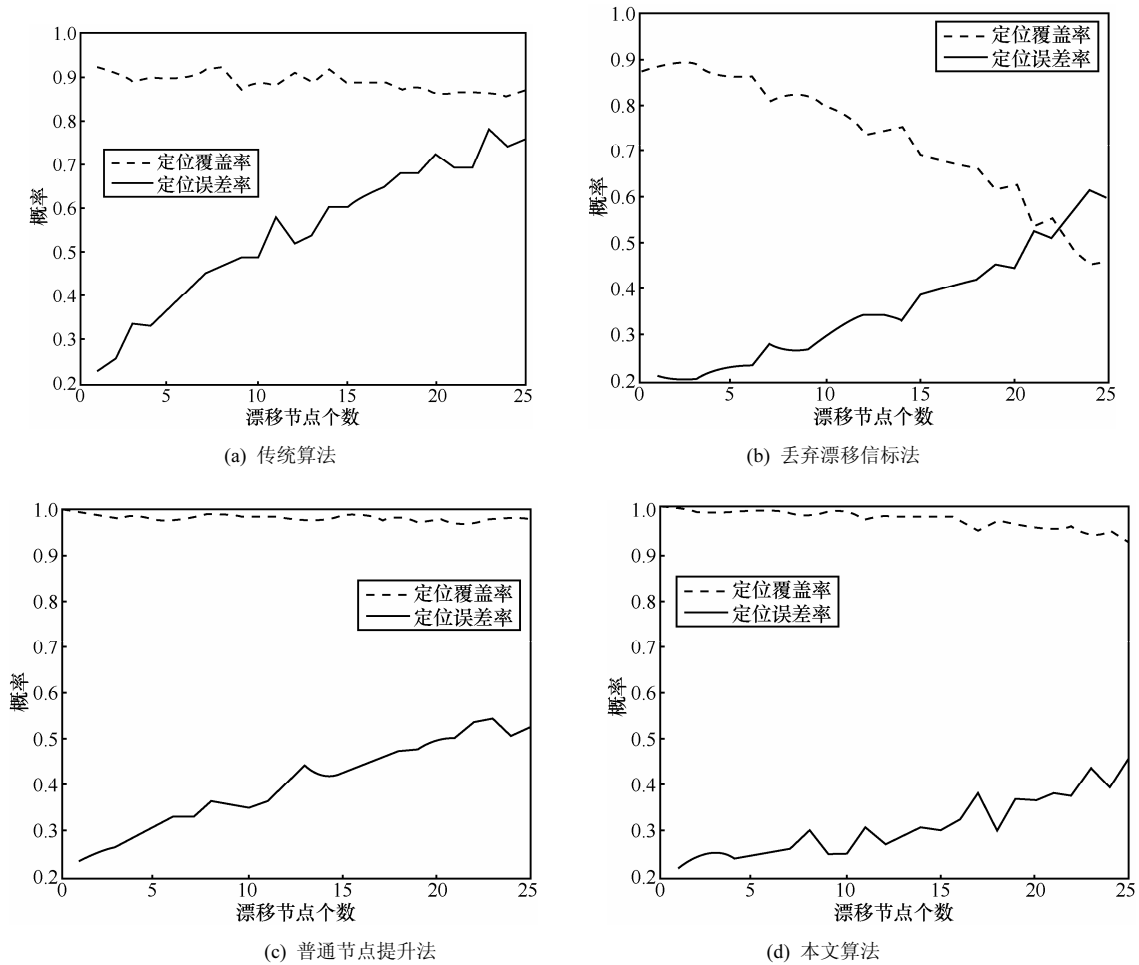


图9 节点重定位方法性能比较

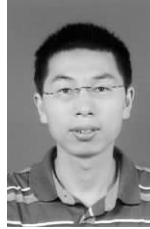
参考文献:

- [1] SHI H, WANG W, KWOK N M, *et al.* Game theory for wireless sensor networks: a survey[J]. *Sensors*, 2012, 12(7):9055-9097.
- [2] JANG W S, LEE D E, CHOI J H. Ad-hoc performance of wireless sensor network for large scale civil and construction engineering applications[J]. *Automation in Construction*, 2012, 26(10): 32-45.
- [3] HACKMANN G, SUN F, CASTANEDA N, *et al.* A holistic approach to decentralized structural damage localization using wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2012, 36(1):29-41.
- [4] SHEN X S, LU M. A framework for indoor construction resources tracking by applying wireless sensor networks[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2012, 39(9):1083-1088.
- [5] GHOLAMI M, CAI N, BEMNAN R W. An artificial neural network approach to the problem of wireless sensors network localization[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 29(1): 96-109.
- [6] COTA-RUIZ J, ROSILES J G, SIFUENTES E, *et al.* A low-complexity geometric bilateration method for localization in wireless sensor networks and its comparison with least-squares methods[J]. *Sensors*, 2012, 12(1):839-862.
- [7] MIN H F, YEI L W. Investigating target detection and localization in wireless sensor network[J]. *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, 2012, 41:75-81.
- [8] KO S, TAKAYAMA J, OHYAMA S. Proposal of generalized vernier effect and its practical advantage for RF time-of-flight ranging between sensor nodes in wireless sensor networks[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2011, 167(2):537-547.
- [9] JARRAY F. A lagrangean-based heuristics for the target covering problem in wireless sensor network[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(10-11):6780-6785.
- [10] CHANG C T, CHANG C Y, LIN C Y. Anchor-guiding mechanism for beacon-assisted localization in wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5):1098-1111.
- [11] BAO H, ZHANG B X, LI C. Mobile anchor assisted particle swarm optimization (PSO) based localization algorithms for wireless sensor networks[J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2012, 12(15):1313-1325.
- [12] KUO S P, KUO H J, TSENG Y C. The beacon movement detection problem in wireless sensor networks for localization applications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(10):1326-1338.

- [13] KUO S P, KUO H J, TSENG Y C, *et al.* Detecting movement of beacons in location-tracking wireless sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE 66th Vehicular Technology Conference[C]. Baltimore, USA, 2007. 362-366.
- [14] MOORE D, LEONARD J, RUS D, *et al.* Robust distributed network localization with noisy range measurements[A]. Proceedings of the SenSys'04 Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. San Diego, USA, 2004. 50-61.
- [15] KANNAN A, FIDAN B, MAO G. Robust distributed sensor network localization based on analysis of flip ambiguities[A]. Proceedings of the Global Telecommunications Conference[C]. New Orleans, USA, 2008. 1-6.
- [16] YANG Z, LIU Y H. Quality of trilateration: confidence-based iterative localization[J]. IEEE transactions on parallel and Distributed Systems, 2009, 21(5):631-640.
- [17] 孙国林, 郭伟. 基于数据融合的蜂窝无线定位算法研究[J]. 通信学报, 2003, 24(1):137-142.
SUN G L, GUO W. The research of cellular location algorithm based on data fusion[J]. Journal on Communication, 2003, 24(1):137-142.
- [18] 朱剑, 赵海, 孙佩刚. 基于 RSSI 均值等边三角形定位算法[J]. 东北大学学报, 2007, 28(8):1094-1097.
ZHU J, ZHAO H, SUN P G. Equilateral triangle localization algorithm based on average RSSI[J]. Journal of Northeastern University, 2007, 28(8):1094-1097.
- [19] ZHENG X C, YU F, ZHANG Y C. A novel energy-regenerative active suspension for vehicles[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2008, 13(2):184-188.
- [20] 方震, 赵湛, 张玉国. 基于 RSSI 测距分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11):2526-2530.
FANG Z, ZHAO Z, ZHANG Y G. Analysis of distance measurement based on RSSI[J]. Journal of Transduction Technology, 2007, 20(11): 2526-2530.
- [21] 廖先林, 耿娜, 石凯等. 无线传感器网络节点自身定位算法[J]. 东北大学学报, 2007, 28(8):801-804.

LIAO X L, GENG N, SHI K, *et al.* Self-localization algorithm for wireless sensor network[J]. Journal of Northeastern University, 2007, 28(8):801-804.

作者简介:



赵小敏 (1976-), 男, 浙江文成人, 博士, 浙江工业大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络、信息安全。



张海洋 (1989-), 男, 黑龙江大庆人, 浙江工业大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



金言 (1988-), 男, 浙江桐庐人, 浙江工业大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



陈庆章 (1955-), 男, 河南济源人, 博士, 浙江工业大学教授, 主要研究方向为无线传感器网络、计算机支持的协同工作。