



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101868026 A

(43) 申请公布日 2010.10.20

(21) 申请号 201010189188.0

(22) 申请日 2010.05.24

(71) 申请人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 于宁 万江文 郭晓雷 吴银锋
冯仁剑

(74) 专利代理机构 北京慧泉知识产权代理有限公司 11232
代理人 王顺荣 唐爱华

(51) Int. Cl.
H04W 64/00 (2009.01)
H04W 84/18 (2009.01)

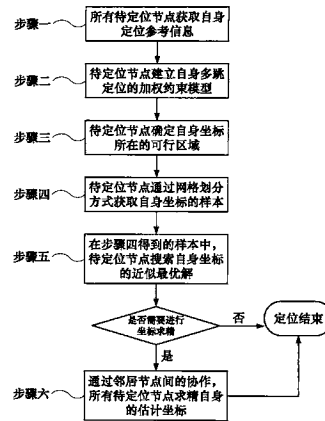
权利要求书 4 页 说明书 10 页 附图 6 页

(54) 发明名称

一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法,包括以下步骤:一、所有待定位节点获取自身定位参考信息;二、待定位节点建立自身多跳定位的加权约束模型;三、待定位节点确定自身坐标所在的可行区域;四、待定位节点通过网格划分的方式获取自身坐标的样本;五、待定位节点从样本中搜索自身坐标的近似最优解;六、待定位节点求精自身的估计坐标。本发明通过求解约束方环交集的方法确定待定位节点坐标的可行区域,减小了节点坐标估计的约束范围;利用轻量级的网格扫描方法得到节点坐标的全局近似最优解,在降低计算量的同时,提高了定位精度和网络拓扑自适应能力。它在无线传感器网络定位技术领域里具有实用价值和广阔的应用前景。



1. 一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法,其特征在于:通过求解约束方环交集确定待定位节点坐标的可行区域,并利用网格扫描的方法获得目标函数的近似最优值,从而实现定位,所述方法通过以下步骤来实现:

步骤一、无线传感器网络中所有待定位节点获取自身定位参考信息;

所述定位参考信息包括信标节点坐标、待定位节点到信标节点的估计距离、待定位节点局部密度、多跳距离局部密度和多跳距离跳数;所述待定位节点指自身坐标未知,需要进行自定位的节点;所述信标节点指自身坐标已知,能够辅助待定位节点实现定位的节点;所述邻居节点指能与某一节点直接通讯的所有节点的集合,称为该节点的邻居节点;所述节点局部密度是指节点通讯范围内邻居节点的数目;所述多跳距离是指两个节点间能传输数据帧的最短路径的长度;所述多跳距离跳数是指两个节点间多跳距离所在的最短路径包含的跳段数目;所述多跳距离局部密度是指多跳距离所在的最短路径包含的所有节点的自身局部密度之和;

无线传感器网络中每个节点通过和自身邻居节点进行信息交互,获取自身局部密度,并测出自身到邻居节点的距离;通过所有信标节点的位置信息数据帧在无线传感器网络中进行多跳传播,所有待定位节点获取自身到自身多跳通讯范围内所有信标节点的多跳距离、多跳距离跳数和多跳距离局部密度;

其具体实现方式如下:

(1) 无线传感器网络中所有节点通过和自身邻居节点进行信息交互,得到自身局部密度,并测出自身到邻居节点的距离;

(2) 信标节点 N_i 向无线传感器网络中广播包含自身 ID 和自身坐标的位置信息数据帧 $Frame_i$, $Frame_i$ 的格式如下:

$$Frame_i = \{i, X_i, H_i, d_i, \hat{D}_i\} \quad (1)$$

其中, H_i 为 $Frame_i$ 所经过的跳段数目,初始化为 0; d_i 为 $Frame_i$ 所经过的跳段距离之和,初始化为 0; \hat{D}_i 为 $Frame_i$ 所经过的所有节点的局部密度之和,初始化为信标节点 N_i 的局部密度 D_i ;

(3) 当无线传感器网络中一个节点 N_p 接收到自身邻居节点 N_q 发送或转发的信标节点 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时,判断节点自身是否收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$, 这里 p, q 代表节点的 ID,取自然数, $p \neq q$;

①当节点 N_p 没有收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时,则需更新 $Frame_i$, 更新后的信标节点位置信息数据帧 $Frame'_i$ 为:

$$Frame'_i = \{i, X_i, (H_i + 1), (d_i + d_{pq}), (\hat{D}_i + D_p)\} \quad (2)$$

其中, d_{pq} 为节点 N_p 到邻居节点 N_q 的测量距离, D_p 为节点 N_p 的局部密度,节点保存更新后的信标节点 N_i 的位置信息数据帧 $Frame'_i$, 并判断 $(H_i + 1) < TTL$ 是否成立,其中 TTL 为信标节点位置信息数据帧的生命周期;如果成立, N_p 将 $Frame'_i$ 广播给邻居节点;如果不成立, N_p 不广播 $Frame'_i$ 给邻居节点;

②当节点 N_p 收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时,判断新收到的 $Frame_i$ 中的 d_i 加上 d_{pq} 后是否小于节点自身已保存的 $Frame_i$ 中的 d_i ;

如果小于,则按照式 (2) 更新节点自身保存的 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 为

Frame' _i, 并将 Frame' _i 广播给整邻居节点 ; 否则, 不更新自身已保存的 N_i 的位置信息数据帧 Frame_i ;

当无线传感器网络中不再有信息交互时, 待定位节点 N_a 可以获得自身的定位参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} (i = 1, 2, ..., m) ; 其中, N_a 记录的自身到自身 TTL 范围内信标节点 N_i 的位置信息数据帧 Frame_i 中的 d_i, H_i 和 \hat{D}_i 即为参考信息 REF_i 中的 d_{ai}, H_{ai} 和 S_{ai} ;

步骤二、待定位节点建立自身多跳定位的加权约束模型 ;

待定位节点 N_a 根据自身获得的定位参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} (i = 1, 2, ..., m), 建立自身多跳定位的加权约束模型 :

$$\hat{X}_a = \arg \min_{X_a} \sum_{i=1}^m w_{ai} (\|X_a - X_i\|_2 - d_{ai})^2 \quad (3)$$

subject to $X_a \in FR_a$

其中, X_a 为待定位节点 N_a 的实际坐标, \hat{X}_a 为 N_a 的估计坐标, X_i 为 N_a 多跳通讯范围内的信标节点 N_i (i = 1, 2, ..., m) 的坐标, 其中 α, i 为节点的 ID, 均为自然数, 且 $a \neq i$, m 为 N_a 多跳通讯范围内的信标节点的数量 ; d_{ai} 为待定位节点 N_a 到信标节点 N_i 的估计距离 ; 如果 N_i 是 N_a 的邻居节点, 则 d_{ai} 为两节点间的测量距离 ; 如果 N_i 不是 N_a 的邻居节点, 则 d_{ai} 为两节点间的多跳距离 ; w_{ai} 为定位参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} 的权重, D_a 为待定位节点 N_a 的局部密度, S_{ai} 为多跳距离 d_{ai} 的多跳局部密度, H_{ai} 为多跳距离 d_{ai} 的多跳距离跳数 ; FR_a 为待定位节点 N_a 坐标 X_a 的可行区域 ; 所述待定位节点坐标的可行区域指待定位节点根据与自身多跳通讯范围内所有信标节点的几何约束关系确定的自身坐标的范围 ;

其中, 权重 w_{ai} 取值规则如下 :

- (1) N_a 到信标节点 N_i 的距离估计误差 ε_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 越小, 即 $w_{ai} \propto (1/\varepsilon_{ai})$;
- (2) N_a 到 N_i 的多跳距离跳数 H_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 的取值越小, 即 $w_{ai} \propto (1/H_{ai})$;
- (3) N_a 到 N_i 的多跳距离局部密度 S_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 的取值越大, 即 $w_{ai} \propto S_{ai}$;
- (4) 测距误差比例系数 α 越大, N_a 与 N_i 节点相邻时对应的 w_{ai} 越小, N_a 与 N_i 不相邻时对应的 w_{ai} 越大, 但 N_a 与 N_i 相邻时对应的 w_{ai} 取值始终大于 N_a 与 N_i 不相邻时的取值 ; 所述测距误差比例系数指节点间测距误差与节点间欧式距离比值的绝对值的最大值, 其大小反映出节点测距性能的优劣 ;

步骤三、通过求解约束方环交集, 待定位节点确定自身坐标所在的可行区域 ;

待定位节点 N_a 根据自身获得的一组参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} , 获得自身坐标的一个约束方环 BSR_{ai} 通过求解所有约束方环的交集, 即可得到 N_a 坐标 X_a 的可行区域 FR_a ; 所述约束方环指待定位节点 N_a 根据一组参考信息确定出的自身坐标所在的一个方环区域 ; 具体实现方式如下 :

(1) 待定位节点 N_a 根据自身获得的参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} , 确定自身坐标的所在的圆环区域 C_{ai} ;

① 如果 N_a 和信标节点 N_i 相邻, 这时 d_{ai} 为两节点间的测量距离, 测距误差 $\varepsilon_{ai} \in (-\alpha \hat{d}_{ai}, \alpha \hat{d}_{ai})$, $\hat{d}_{ai} = \|X_a - X_i\|_2$ 为两节点间的欧式距离, α 为测距误差比例系数 ; 根据参考信息 REF_i, 可以得出, N_a 处在以 X_i 为中心, R_{ai} = d_{ai} / (1 - α) 为外径, r_{ai} = d_{ai} / (1 + α) 为内径的圆环区域 C_{ai} 中 ;

② 如果 N_a 和信标节点 N_i 不相邻, 但两节点可以通过多跳的方式相互通讯, 这时 d_{ai} 为两

节点间的多跳距离;根据参考信息 REF_i , 可以得出, N_a 又处在以 $R_{ai} = d_{ai}/(1-\alpha)$ 为外径, $r_{ai} = R$ 为内径的圆环区域 C_{ai} 中, 这里 R 为节点的通讯半径;

(2) 分别做出 C_{ai} 外圆的外接正方形 S_{ai}^o 和内圆的内接正方形 S_{ai}^l , $O_{ai} = 2R_{ai}$ 和 $I_{ai} = \sqrt{2}r_{ai}$ 分别为 S_{ai}^o 和 S_{ai}^l 的边长; 这样, 由 S_{ai}^o 和 S_{ai}^l 所围成的区域即为 N_a 的一个约束方环, 记作 BSR_{ai} ;

(3) 当 N_a 求出所有约束方环 BSR_{ai} 后, 通过求解所有约束方环的交集即可得到待定位节点 N_a 的坐标 X_a 的可行区域 FR_a ;

步骤四、根据步骤三得到的可行区域, 待定位节点通过网格划分的方式获取自身位置坐标的一组样本;

设定坐标估计网格粒度 g_a , 根据 g_a 将 N_a 的可行区域 FR_a 划分为 s_a 个子网格, 然后以每个子网格的中心坐标作为 N_a 位置坐标 X_a 的样本取值 $X_a(k)$, k 为自然数, $k = 1, 2, \dots, s_a$, 通过这种方式获得的样本集合:

$$\Omega_a = \{X_a(1), X_a(2), \dots, X_a(s_a)\} \quad (4)$$

所述坐标估计网格粒度指将待定位节点坐标的可行区域划分成的子网格的大小, 一般用子网格的边长与节点通讯半径的比值来表示;

步骤五、在步骤四得到的样本中, 待定位节点搜索自身位置坐标的近似最优解;

在步骤四得到的 Ω_a 中, 通过遍历的方式搜索使模型 (3) 中目标函数取值最小的样本点 $X_a(\min)$, 将其作为待定位节点 N_a 初始估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$, 即 $\hat{X}_a^{(0)} = X_a(\min)$;

步骤六、通过邻居节点间的协作, 所有待定位节点求精自身的估计坐标;

通过步骤五得到待定位节点 N_a 的初始估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$ 后, 如果不需要进一步提高定位精度, 则定位过程结束, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(0)}$; 如果需要进一步提高定位精度, 则进入节点协作求精阶段, 通过相邻节点间的协作, 得到待定位节点 N_a 求精后的估计坐标 $\hat{X}_a^{(1)}$, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$;

节点协作求精的具体实现方式如下:

(1) 设节点协作求精的迭代次数 $T = 0$;

(2) 所有信标节点向网络中广播自身的坐标, 所有待定位节点向网络中广播自身的最新估计坐标, 待定位节点 N_a 根据自身邻居节点广播的坐标或估计坐标和节点间的测量距离, 建立如下坐标求精目标函数:

$$\hat{X}_a^{(1)} = \arg \min_{X_a} \sum_{j=1}^{K_a} w_{aj} (\|X_a - \hat{X}_j^{(0)}\| - d_{aj})^2 \quad (5)$$

其中, $\hat{X}_j^{(0)} (j=1, 2, \dots, K_a)$ 为 N_a 的邻居节点 N_j 广播的坐标, K_a 为 N_a 邻居节点的数目, d_{aj} 为 N_a 到 N_j 的测量距离, w_{aj} 为距离约束条件 $\{\hat{X}_j^{(0)}, d_{aj}\}$ 的权重; w_{aj} 的取值方式同邻居节点 N_j 广播的坐标 $\hat{X}_j^{(0)}$ 的精度有关, 当 N_j 为信标节点时, $\hat{X}_j^{(0)}$ 的精度较高, 此时 w_{aj} 的权重最大; 当 N_j 为待定位节点时, 可以根据 N_j 初始坐标估计阶段可行区域 FR_j 的面积来判断 $\hat{X}_j^{(0)}$ 的估计精度, 进一步得到 w_{aj} 的取值;

(3) 以 N_a 的估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$ 为中心, 边长为 1 的正方形作为节点 N_a 坐标求精的可行区域 FR'_a ; 设定 N_a 坐标求精网格粒度 r_a , 一般 $r_a \leq g_a$; 所述坐标求精网格粒度指将待定位节点坐标求精的可行区域划分成的子网格的大小, 一般用子网格的边长与节点通讯半径的比值来表示; 根据 r_a 将 FR'_a 划分为 k_a 个子网格, 以每个子网格中心的坐标作为 N_a 坐标求精的样本

$X_a(k)$, k 为自然数, $k = 1, 2, \dots, k_a$; 通过这种方式获得 N_a 坐标求精的样本集合:

$$\Theta'_a = \{X'_a(1), X'_a(2), \dots, X'_a(k_a)\} \quad (6)$$

其中, k_a 为坐标求精样本的数量;

(4) 遍历 Θ'_a 得到目标函数 (5) 的近似最优解 $\hat{X}_a^{(1)}$, 同时, 令 $T = T+1$;

(5) 判断节点协作求精迭代停止条件 $\|\hat{X}_a^{(1)} - \hat{X}_a^{(0)}\|_2 \leq \varepsilon$ 是否成立, ε 通常取大于 0 且小于 r_a 的一个实数;

若条件成立, 节点协作求精停止, $\hat{X}_a^{(1)}$ 即为待定位节点 N_a 的求精后的估计坐标, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$; 否则, 转到下一步;

(6) 判断 $T \geq T_{\max}$ 是否成立, T_{\max} 为设定的节点协作求精的最大迭代次数;

如果成立, 节点协作求精停止, $\hat{X}_a^{(1)}$ 即为待定位节点 N_a 求精后的估计坐标; 否则, 令 $\hat{X}_a^{(0)} = \hat{X}_a^{(1)}$, 返回到步骤 (2), 直到节点协作求精停止, 最后输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$ 。

一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法

(一) 技术领域

[0001] 本发明涉及一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法,它是信标节点稀疏部署的大规模无线传感器网络的节点自定位,属于无线传感器网络定位技术领域。

(二) 背景技术

[0002] 无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN) 是由大量的传感器节点以无线通讯的方式组成的多跳自组织网络系统,网络化智慧感知、低成本和布置灵活,是其被看好的主要原因。无线传感器节点具有数据采集、处理和通信等功能,可实时监测、感知和处理无线传感器网络分布区域内的各种环境信息,然后传送给所需要信息的终端用户。无线传感器网络在军事安全、环境监测及预报、工业控制、交通运输、智能家居、物流管理、智能农业和医疗护理等多方面都有很广泛的用途。

[0003] 定位技术作为无线传感器网络的关键支撑技术,对其应用和基于位置的网络协议研究都有重要意义。例如,监测森林火险的无线传感器网络在监测到火情时,不仅需要及时报告火灾情况,还需要报告火灾发生的地理位置,以便消防部门能及时赶到事发地点;天然气管道出现泄漏时,部署在管网上的传感器节点除了能报告泄漏信息外,还需要提供具体泄漏的位置;部署在战场上的无线传感器网络只有提供了敌人的具体位置,才能对其实施精准的打击等,这些功能的实现都要求传感器节点事先知道自身的位置。然而,在无线传感器网络实际应用中,传感器节点通常随机部署(如飞机布撒)在不同的环境中执行各种监测任务,自身的位置无法事先确定,因此节点在部署后首先需要实时地进行自定位。定位技术对于无线传感器网络基于位置的网络协议(如网络管理、地理路由等)的研究也有重要意义。

[0004] 网络中未知坐标的节点(待定位节点)要实现定位需要借助于一定的参考信息,如信标节点的坐标、自身到信标节点间的距离等。由于信标节点通常装备 GPS 模块或通过人工部署来获取自身位置信息,提高信标节点密度会极大地增加网络构建成本,因此传感网中信标节点往往以稀疏的形式部署,此时,许多待定位节点可能收不到足够的参考信息实现定位。为了解决这个问题,一般采用三种方法来处理:集中定位、迭代定位和多跳定位。集中定位是指中心节点利用网络中所有节点的连通度信息生成全局拓扑图从而实现定位的方法。集中定位虽然精度较高,但其对网络的连通性要求比较严格,通讯消耗较大,方法的扩展性也较差,不适用于大规模无线传感器网络的应用。与集中定位不同,迭代定位和多跳定位是两种分布式定位方法。迭代定位中,经过坐标计算的待定位节点升级为信标节点,并辅助其他节点实现定位。迭代定位在小规模网络中性能较好,但在大型网络中,随着迭代次数的增加,定位误差会逐级传播并放大,最终导致定位错误;此外,迭代定位的周期较长,不适用于实时性要求较高的场合。待定位节点通过和邻居节点的协作,利用自身通信范围内之外的信标节点实现定位的方法称为多跳定位。多跳定位避免了定位误差的传播,定位实时性较好,能量消耗及成本较低,可以满足网络规模化应用的需要。

[0005] 2001年,尼古列斯库等人在距离向量 (Distance Vector, DV) 路由的基础上,提出

的 DV-hop 和 DV-distance 方法是多跳定位思想在无线传感器网络的最初应用：在定位初始阶段，所有信标节点广播自身的坐标，并通过泛洪的方式在网络中传播，每个未知节点统计自身到信标节点的最小跳数或最短距离，最后基于多边定位方法计算出自身坐标；尚易等人研究了不同的锚节点选择方案和坐标优化计算方法对传感网多跳定位的影响，实验分析表明使用距离待定位节点最近的四个信标节点作为参考，并通过非线性最小二乘优化方法求解节点坐标，在节点密集部署的网络中能够达到较好的性能；赫廉等人采用截断奇异值分解伪逆技术得到多跳距离估计同欧式距离间的映射关系 (Proximiry-Distance Map, PDM)，PDM 保留了尽可能多的网络拓扑信息，可以减小距离估计噪声对定位性能的影响；王晨等人提出的 i-Multihop 定位方法，通过上限约束方法过滤掉由于网络拓扑不规则导致的错误距离估计值，并与距离一致性条件相结合，实现凹网络中较为精确的多跳定位。

[0006] 上述方法分别从不同角度对多跳定位中存在的问题进行了分析和处理，但普遍仍存在如下问题：节点坐标计算过程中，定位参考信息的优先级过于单一，甚至将多跳和一跳参考信息按相同的优先级处理，定位精度较低；选择性使用参考信息进行定位的方法，由于未充分利用全部有用信息，定位覆盖率不能得到保证；未权衡计算复杂度和定位精度间的关系，而且容易陷入局部极小值等。这些问题的存在，限制了多跳定位在大规模无线传感器网络中的应用，影响了无线传感器网络的进一步发展。

(三) 发明内容

[0007] 1、目的：本发明的目的是为了解决上述问题，提供一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法，首先建立无线传感器网络多跳定位加权约束模型，然后通过求解约束方环交集确定待定位节点的可行区域，并利用网格扫描的方法获得目标函数的近似最优值，从而实现定位。

[0008] 2、技术方案：本发明一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法，通过以下步骤来实现：

[0009] 步骤一、无线传感器网络中所有待定位节点获取自身定位参考信息；

[0010] 所述定位参考信息包括信标节点坐标、待定位节点到信标节点的估计距离、待定位节点局部密度、多跳距离局部密度和多跳距离跳数；所述待定位节点指自身坐标未知，需要进行自定位的节点；所述信标节点指自身坐标已知，能够辅助待定位节点实现定位的节点；所述邻居节点指能与某一节点直接通讯的所有节点的集合，称为该节点的邻居节点；所述节点局部密度是指节点通讯范围内邻居节点的数目；所述多跳距离是指两个节点间能传输数据帧的最短路径的长度；所述多跳距离跳数是指两个节点间多跳距离所在的最短路径包含的跳段数目；所述多跳距离局部密度是指多跳距离所在的最短路径包含的所有节点的自身局部密度之和；

[0011] 无线传感器网络中每个节点通过和自身邻居节点进行信息交互，获取自身局部密度，并测出自身到邻居节点的距离；通过所有信标节点的位置信息数据帧在无线传感器网络中进行多跳传播，所有待定位节点获取自身到自身多跳通讯范围内所有信标节点的多跳距离、多跳距离跳数和多跳距离局部密度；

[0012] 其具体实现方式如下：

[0013] (1) 无线传感器网络中所有节点通过和自身邻居节点进行信息交互，得到自身局

部密度,并测出自身到邻居节点的距离;

[0014] (2) 信标节点 N_i 向无线传感器网络中广播包含自身 ID 和自身坐标的位置信息数据帧 $Frame_i$, $Frame_i$ 的格式如下:

$$[0015] \quad Frame_i = \{i, X_i, H_i, d_i, \hat{D}_i\} \quad (1)$$

[0016] 其中, H_i 为 $Frame_i$ 所经过的跳段数目,初始化为 0; d_i 为 $Frame_i$ 所经过的跳段距离之和,初始化为 0; \hat{D}_i 为 $Frame_i$ 所经过的所有节点的局部密度之和,初始化为信标节点 N_i 的局部密度 D_i ;

[0017] (3) 当无线传感器网络中一个节点 N_p 接收到自身邻居节点 N_q 发送或转发的信标节点 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时,判断节点自身是否收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$, 这里 p, q 代表节点的 ID,取自然数, $p \neq q$;

[0018] ①当节点 N_p 没有收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时,则需更新 $Frame_i$, 更新后的信标节点位置信息数据帧 $Frame'_i$ 为:

$$[0019] \quad Frame'_i = \{i, X_i, (H_i + 1), (d_i + d_{pq}), (\hat{D}_i + D_p)\} \quad (2)$$

[0020] 其中, d_{pq} 为节点 N_p 到邻居节点 N_q 的测量距离, D_p 为节点 N_p 的局部密度, 节点保存更新后的信标节点 N_i 的位置信息数据帧 $Frame'_i$, 并判断 $(H_i + 1) < TTL$ 是否成立, 其中 TTL 为信标节点位置信息数据帧的生命周期; 如果成立, N_p 将 $Frame'_i$ 广播给邻居节点; 如果不成立, N_p 不广播 $Frame'_i$ 给邻居节点;

[0021] ②当节点 N_p 收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时,判断新收到的 $Frame_i$ 中的 d_i 加上 d_{pq} 后是否小于节点自身已保存的 $Frame_i$ 中的 d_i ;

[0022] 如果小于, 则按照式 (2) 更新节点自身保存的 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 为 $Frame'_i$, 并将 $Frame'_i$ 广播给整邻居节点; 否则, 不更新自身已保存的 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$;

[0023] 当无线传感器网络中不再有信息交互时, 待定位节点 N_a 可以获得自身的定位参考信息 $REF_i = \{X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}\}$ ($i = 1, 2, \dots, m$); 其中, N_a 记录的自身到自身 TTL 范围内信标节点 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 中的 d_i, H_i 和 \hat{D}_i 即为参考信息 REF_i 中的 d_{ai}, H_{ai} 和 S_{ai} ;

[0024] 步骤二、待定位节点建立自身多跳定位的加权约束模型;

[0025] 待定位节点 N_a 根据自身获得的定位参考信息 $REF_i = \{X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}\}$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 建立自身多跳定位的加权约束模型:

$$[0026] \quad \hat{X}_a = \arg \min_{X_a} \sum_{i=1}^m w_{ai} (\|X_a - X_i\|_2 - d_{ai})^2 \quad (3)$$

[0027] subject to $X_a \in FR_a$

[0028] 其中, X_a 为待定位节点 N_a 的实际坐标, \hat{X}_a 为 N_a 的估计坐标, X_i 为 N_a 多跳通讯范围内的信标节点 N_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 的坐标, 其中 a, i 为节点的 ID, 均为自然数, 且 $a \neq i$, m 为 N_a 多跳通讯范围内的信标节点的数量; d_{ai} 为待定位节点 N_a 到信标节点 N_i 的估计距离; 如果 N_i 是 N_a 的邻居节点, 则 d_{ai} 为两节点间的测量距离; 如果 N_i 不是 N_a 的邻居节点, 则 d_{ai} 为两节点间的多跳距离; w_{ai} 为定位参考信息 $REF_i = \{X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}\}$ 的权重, D_a 为待定位节点 N_a 的局部密度, S_{ai} 为多跳距离 d_{ai} 的多跳局部密度, H_{ai} 为多跳距离 d_{ai} 的多跳距离跳数; FR_a 为待定位节点 N_a 坐标 X_a 的可行区域; 所述待定位节点坐标的可行区域指待定位

节点根据与自身多跳通讯范围内所有信标节点的几何约束关系确定的自身坐标的范围；

[0029] 其中, 权重 w_{ai} 取值规则如下：

[0030] (1) N_a 到信标节点 N_i 的距离估计误差 ε_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 越小, 即 $w_{ai} \propto (1/\varepsilon_{ai})$ ；

[0031] (2) N_a 到 N_i 的多跳距离跳数 H_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 的取值越小, 即 $w_{ai} \propto (1/H_{ai})$ ；

[0032] (3) N_a 到 N_i 的多跳距离局部密度 S_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 的取值越大, 即 $w_{ai} \propto S_{ai}$ ；

[0033] (4) 测距误差比例系数 α 越大, N_a 与 N_i 节点相邻时对应的 w_{ai} 越小, N_a 与 N_i 不相邻时对应的 w_{ai} 越大, 但 N_a 与 N_i 相邻时对应的 w_{ai} 取值始终大于 N_a 与 N_i 不相邻时的取值；所述测距误差比例系数指节点间测距误差与节点间欧式距离比值的绝对值的最大值, 其大小反映出节点测距性能的优劣；

[0034] 步骤三、通过求解约束方环交集, 待定位节点确定自身坐标所在的可行区域；

[0035] 待定位节点 N_a 根据自身获得的一组参考信息 $REF_i = \{X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}\}$, 获得自身坐标的一个约束方环 BSR_{ai} , 通过求解所有约束方环的交集, 即可得到 N_a 坐标 X_a 的可行区域 FR_a ; 所述约束方环指待定位节点 N_a 根据一组参考信息确定出的自身坐标所在的一个方环区域; 具体实现方式如下：

[0036] (1) 待定位节点 N_a 根据自身获得的参考信息 $REF_i = \{X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}\}$, 确定自身坐标的所在的圆环区域 C_{ai} ；

[0037] ①如果 N_a 和信标节点 N_i 相邻, 这时 d_{ai} 为两节点间的测量距离, 测距误差 $\varepsilon_{ai} \in (-\alpha \hat{d}_{ai}, \alpha \hat{d}_{ai})$, $\hat{d}_{ai} = \|X_a - X_i\|_2$ 为两节点间的欧式距离, α 为测距误差比例系数; 根据参考信息 REF_i , 可以得出, N_a 处在以 X_i 为中心, $R_{ai} = d_{ai}/(1-\alpha)$ 为外径, $r_{ai} = d_{ai}/(1+\alpha)$ 为内径的圆环区域 C_{ai} 中；

[0038] ②如果 N_a 和信标节点 N_i 不相邻, 但两节点可以通过多跳的方式相互通讯, 这时 d_{ai} 为两节点间的多跳距离; 根据参考信息 REF_i , 可以得出, N_a 又处在以 $R_{ai} = d_{ai}/(1-\alpha)$ 为外径, $r_{ai} = R$ 为内径的圆环区域 C_{ai} 中, 这里 R 为节点的通讯半径；

[0039] (2) 分别做出 C_{ai} 外圆的外接正方形 S_{ai}^o 和内圆的内接正方形 S_{ai}^l , $O_{ai} = 2R_{ai}$ 和 $I_{ai} = \sqrt{2}r_{ai}$ 分别为 S_{ai}^o 和 S_{ai}^l 的边长; 这样, 由 S_{ai}^o 和 S_{ai}^l 所围成的区域即为 N_a 的一个约束方环, 记作 BSR_{ai} ；

[0040] (3) 当 N_a 求出所有约束方环 BSR_{ai} 后, 通过求解所有约束方环的交集即可得到待定位节点 N_a 的坐标 X_a 的可行区域 FR_a ；

[0041] 步骤四、根据步骤三得到的可行区域, 待定位节点通过网格划分的方式获取自身位置坐标的一组样本；

[0042] 设定坐标估计网格粒度 g_a , 根据 g_a 将 N_a 的可行区域 FR_a 划分为 s_a 个子网格, 然后以每个子网格的中心坐标作为 N_a 位置坐标 X_a 的样本取值 $X_a(k)$, k 为自然数, $k = 1, 2, \dots, s_a$, 通过这种方式获得的样本集合：

$$[0043] \quad \Omega_a = \{X_a(1), X_a(2), \dots, X_a(s_a)\} \quad (4)$$

[0044] 所述坐标估计网格粒度指将待定位节点坐标的可行区域划分成的子网格的大小, 一般用子网格的边长与节点通讯半径的比值来表示；

[0045] 步骤五、在步骤四得到的样本中, 待定位节点搜索自身位置坐标的近似最优解；

[0046] 在步骤四得到的 Ω_a 中, 通过遍历的方式搜索使模型 (3) 中目标函数取值最小的

样本点 $X_a(\min)$, 将其作为待定位节点 N_a 初始估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$, 即 $\hat{X}_a^{(0)} = X_a(\min)$;

[0047] 步骤六、通过邻居节点间的协作, 所有待定位节点求精自身的估计坐标;

[0048] 通过步骤五得到待定位节点 N_a 的初始估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$ 后, 如果不需要进一步提高定位精度, 则定位过程结束, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(0)}$; 如果需要进一步提高定位精度, 则进入节点协作求精阶段, 通过相邻节点间的协作, 得到待定位节点 N_a 求精后的估计坐标 $\hat{X}_a^{(1)}$, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$;

[0049] 节点协作求精的具体实现方式如下:

[0050] (1) 设节点协作求精的迭代次数 $T = 0$;

[0051] (2) 所有信标节点向网络中广播自身的坐标, 所有待定位节点向网络中广播自身的最新估计坐标, 待定位节点 N_a 根据自身邻居节点广播的坐标或估计坐标和节点间的测量距离, 建立如下坐标求精目标函数:

$$[0052] \quad \hat{X}_a^{(1)} = \arg \min_{X_a} \sum_{i=1}^{K_a} w_{aj} (\|X_a - \hat{X}_j^{(0)}\| - d_{aj})^2 \quad (5)$$

[0053] 其中, $\hat{X}_j^{(0)} (j=1, 2, \dots, K_a)$ 为 N_a 的邻居节点 N_j 广播的坐标, K_a 为 N_a 邻居节点的数目, d_{aj} 为 N_a 到 N_j 的测量距离, w_{aj} 为距离约束条件 $\{\hat{X}_j^{(0)}, d_{aj}\}$ 的权重; w_{aj} 的取值方式同邻居节点 N_j 广播的坐标 $\hat{X}_j^{(0)}$ 的精度有关, 当 N_j 为信标节点时, $\hat{X}_j^{(0)}$ 的精度较高, 此时 w_{aj} 的权重最大; 当 N_j 为待定位节点时, 可以根据 N_j 初始坐标估计阶段可行区域 FR_j 的面积来判断 $\hat{X}_j^{(0)}$ 的估计精度, 进一步得到 w_{aj} 的取值;

[0054] (3) 以 N_a 的估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$ 为中心, 边长为 1 的正方形作为节点 N_a 坐标求精的可行区域 FR_a' ; 设定 N_a 坐标求精网格粒度 r_a , 一般 $r_a \leq g_a$; 所述坐标求精网格粒度指将待定位节点坐标求精的可行区域划分成的子网格的大小, 一般用子网格的边长与节点通讯半径的比值来表示; 根据 r_a 将 FR_a' 划分为 k_a 个子网格, 以每个子网格中心的坐标作为 N_a 坐标求精的样本 $X_a(k)$, k 为自然数, $k = 1, 2, \dots, k_a$; 通过这种方式获得 N_a 坐标求精的样本集合:

$$[0055] \quad \Theta_a' = \{X_a'(1), X_a'(2), \dots, X_a'(k_a)\} \quad (6)$$

[0056] 其中, k_a 为坐标求精样本的数量;

[0057] (4) 遍历 Θ_a' 得到目标函数 (5) 的近似最优解 $\hat{X}_a^{(1)}$, 同时, 令 $T = T+1$;

[0058] (5) 判断节点协作求精迭代停止条件 $\|\hat{X}_a^{(1)} - \hat{X}_a^{(0)}\|_2 \leq \varepsilon$ 是否成立, ε 通常取大于 0 且小于 r_a 的一个实数;

[0059] 若条件成立, 节点协作求精停止, $\hat{X}_a^{(1)}$ 即为待定位节点 N_a 的求精后的估计坐标, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$; 否则, 转到下一步;

[0060] (6) 判断 $T \geq T_{\max}$ 是否成立, T_{\max} 为设定的节点协作求精的最大迭代次数; 如果成立, 节点协作求精停止, $\hat{X}_a^{(1)}$ 即为待定位节点 N_a 求精后的估计坐标; 否则, 令 $\hat{X}_a^{(0)} = \hat{X}_a^{(1)}$, 返回到步骤 (2), 直到节点协作求精停止, 最后输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$ 。

[0061] 本发明的优点在于:

[0062] (1) 本发明建立了更加接近实际的无线传感器网络多跳定位加权约束模型, 降低

了多跳折线累积误差对多跳定位性能的影响,提高了多跳定位的定位精度和网络拓扑的自适应能力;

[0063] (2) 本发明通过求解约束方环交集的方法确定待定位节点可行区域,通过简单的计算,有效减小了节点坐标估计的约束范围;

[0064] (3) 本发明利用网格扫描的方式求出目标函数的全局近似最优解,在减少计算量的同时,可有效防止其陷入局部最优;此外,通过减小网格粒度和节点协作求精的方式,可进一步提高定位精度。

(四) 附图说明

[0065] 图 1 为本发明一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法流程图;

[0066] 图 2 为本发明待定位节点和信标节点相邻时确定自身坐标所在的约束方环示意图;

[0067] 图 3 为本发明待定位节点和信标节点不相邻时确定自身坐标所在的约束方环示意图;

[0068] 图 4 为本发明待定位节点确定自身坐标所在的可行区域示意图;

[0069] 图 5 为本发明实施例中 H 型无线传感器网络部署结构示意图;

[0070] 图 6 为本发明方法未经节点协作求精时得到节点定位误差概率密度分布图;

[0071] 图 7 为本发明方法经过节点协作求精后得到节点定位误差概率密度分布图。

[0072] 图中符号说明如下:

[0073] 空心圆圈 N_a 和 N_b :待定位节点;

[0074] 实心圆点 N_1 和 N_2 :信标节点;

[0075] d_{a1} :待定位节点 N_a 到信标节点 N_1 的测量距离;

[0076] C_{a1} :待定位节点 N_a 根据定位参考信息 REF_1 确定的自身坐标所在的圆环区域;

[0077] BSR_{a1} :待定位节点 N_a 根据定位参考信息 REF_1 确定的自身坐标所在的约束方环;

[0078] R_{a1} :圆环区域 C_{a1} 外圆的半径;

[0079] r_{a1} :圆环区域 C_{a1} 内圆的半径;

[0080] O_{a1} :约束方环 BSR_{a1} 外正方形的边长;

[0081] I_{a1} :约束方环 BSR_{a1} 内正方形的边长;

[0082] d_{ab} :待定位节点 N_a 到待定位节点 N_b 的测量距离;

[0083] d_{b2} :待定位节点 N_b 到信标节点 N_2 的测量距离;

[0084] C_{a2} :待定位节点 N_a 根据定位参考信息 REF_2 确定的自身坐标所在的圆环区域;

[0085] BSR_{a2} :待定位节点 N_a 根据定位参考信息 REF_2 确定的自身坐标所在的约束方环;

[0086] R_{a2} :圆环区域 C_{a2} 外圆的半径;

[0087] r_{a2} :圆环区域 C_{a2} 内圆的半径;

[0088] O_{a2} :约束方环 BSR_{a2} 外正方形的边长;

[0089] I_{a2} :约束方环 BSR_{a2} 内正方形的边长;

[0090] FS_a :待定位节点 N_a 的坐标所在的可行区域。

(五) 具体实施方式

[0091] 下面将结合附图对本发明作进一步的详细说明。

[0092] 本发明一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法, 流程如图 1 所示, 通过以下步骤来实现:

[0093] 步骤一、无线传感器网络中所有待定位节点获取自身定位参考信息;

[0094] 所述定位参考信息包括信标节点坐标、待定位节点到信标节点的估计距离、待定位节点局部密度、多跳距离局部密度和多跳距离跳数; 所述待定位节点指自身坐标未知, 需要进行自定位的节点; 所述信标节点指自身坐标已知, 能够辅助待定位节点实现定位的节点; 所述邻居节点指能与某一节点直接通讯的所有节点的集合, 称为该节点的邻居节点; 所述节点局部密度是指节点通讯范围内邻居节点的数目; 所述多跳距离是指两个节点间能传输数据帧的最短路径的长度; 所述多跳距离跳数是指两个节点间多跳距离所在的最短路径包含的跳段数目; 所述多跳距离局部密度是指多跳距离所在的最短路径包含的所有节点的自身局部密度之和;

[0095] 无线传感器网络中每个节点通过和自身邻居节点进行信息交互, 获取自身局部密度, 并测出自身到邻居节点的距离; 通过所有信标节点的位置信息数据帧在无线传感器网络中进行多跳传播, 所有待定位节点获取自身到自身多跳通讯范围内所有信标节点的多跳距离、多跳距离跳数和多跳距离局部密度;

[0096] 具体实现方式如下:

[0097] (1) 无线传感器网络中所有节点通过和自身邻居节点进行信息交互, 得到自身局部密度, 并测出自身到邻居节点的距离;

[0098] (2) 信标节点 N_i 向无线传感器网络中广播包含自身 ID 和自身坐标的位置信息数据帧 $Frame_i$, $Frame_i$ 的格式如下:

$$[0099] \quad Frame_i = \{i, X_i, H_i, d_i, \hat{D}_i\} \quad (7)$$

[0100] 其中, H_i 为 $Frame_i$ 所经过的跳段数目, 初始化为 0; d_i 为 $Frame_i$ 所经过的跳段距离之和, 初始化为 0; \hat{D}_i 为 $Frame_i$ 所经过的所有节点的局部密度之和, 初始化为信标节点 N_i 的局部密度 D_i ;

[0101] (3) 当无线传感器网络中一个节点 N_p 接收到自身邻居节点 N_q 发送或转发的信标节点 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时, 判断节点自身是否收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$, 这里 p, q 代表节点的 ID, 取自然数, $p \neq q$;

[0102] ①当节点 N_p 没有收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时, 则需更新 $Frame_i$, 更新后的信标节点位置信息数据帧 $Frame'_i$ 为:

$$[0103] \quad Frame'_i = \{i, X_i, (H_i + 1), (d_i + d_{pq}), (\hat{D}_i + D_p)\} \quad (8)$$

[0104] 其中, d_{pq} 为节点 N_p 到邻居节点 N_q 的测量距离, D_p 为节点 N_p 的局部密度, 节点保存更新后的信标节点 N_i 的位置信息数据帧 $Frame'_i$, 并判断 $(H_i + 1) < TTL$ 是否成立, 其中 TTL 为信标节点位置信息数据帧的生命周期; 如果成立, N_p 将 $Frame'_i$ 广播给邻居节点; 如果不成立, N_p 不广播 $Frame'_i$ 给邻居节点;

[0105] ②当节点 N_p 收到过 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 时, 判断新收到的 $Frame_i$ 中的 d_i 加上 d_{pq} 后是否小于节点自身已保存的 $Frame_i$ 中的 d_i ;

[0106] 如果小于, 则按照式 (8) 更新节点自身保存的 N_i 的位置信息数据帧 $Frame_i$ 为

Frame' _i, 并将 Frame' _i 广播给整邻居节点 ; 否则, 不更新自身已保存的 N_i 的位置信息数据帧 Frame_i ;

[0107] 当无线传感器网络中不再有信息交互时, 待定位节点 N_a 可以获得自身的定位参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} (i = 1, 2, ..., m) ; 其中, N_a 记录的自身到自身 TTL 范围内信标节点 N_i 的位置信息数据帧 Frame_i 中的 d_i、H_i 和 \hat{D}_i 即为参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} 中的 d_{ai}、H_{ai} 和 S_{ai} ;

[0108] 步骤二、待定位节点建立自身多跳定位的加权约束模型 ;

[0109] 待定位节点 N_a 根据自身获得的定位参考信息, 建立自身多跳定位的加权约束模型 :

$$[0110] \quad \hat{X}_a = \arg \min_{X_a} \sum_{i=1}^m w_{ai} (\|X_a - X_i\|_2 - d_{ai})^2 \quad (9)$$

[0111] subject to $X_a \in FR_a$

[0112] 其中, X_a 为待定位节点 N_a 的实际坐标, \hat{X}_a 为 N_a 的估计坐标, X_i 为 N_a 多跳通讯范围内的信标节点 N_i (i = 1, 2, ..., m) 的坐标, 其中 a, i 为节点的 ID, 均为自然数, 且 a ≠ i, m 为 N_a 多跳通讯范围内的信标节点的数量 ; d_{ai} 为待定位节点 N_a 到信标节点 N_i 的估计距离 ; 如果 N_i 是 N_a 的邻居节点, 则 d_{ai} 为两节点间的测量距离 ; 如果 N_i 不是 N_a 的邻居节点, 则 d_{ai} 为两节点间的多跳距离 ; w_{ai} 为定位参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} 的权重, D_a 为待定位节点 N_a 的局部密度, S_{ai} 为多跳距离 d_{ai} 的多跳局部密度, H_{ai} 为多跳距离 d_{ai} 的多跳距离跳数 ; FR_a 为待定位节点 N_a 坐标 X_a 的可行区域 ; 所述待定位节点坐标的可行区域指待定位节点根据与自身多跳通讯范围内所有信标节点的几何约束关系确定的自身坐标的范围 ; 其中, 权重 w_{ai} 取值规则如下 :

[0113] (1) N_a 到信标节点 N_i 的距离估计误差 ε_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 越小, 即 w_{ai} ∝ (1/ε_{ai}) ;

[0114] (2) N_a 到 N_i 的多跳距离跳数 H_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 的取值越小, 即 w_{ai} ∝ (1/H_{ai}) ;

[0115] (3) N_a 到 N_i 的多跳距离局部密度 S_{ai} 越大, 相应的 w_{ai} 的取值越大, 即 w_{ai} ∝ S_{ai} ;

[0116] (4) 测距误差比例系数 α 越大, N_a 与 N_i 节点相邻时对应的 w_{ai} 越小, N_a 与 N_i 不相邻时对应的 w_{ai} 越大, 但 N_a 与 N_i 相邻时对应的 w_{ai} 取值始终大于 N_a 与 N_i 不相邻时的取值 ; 所述测距误差比例系数指节点间测距误差与节点间欧式距离比值的绝对值的最大值, 其大小反映出节点测距性能的优劣 ;

[0117] 步骤三、待定位节点确定自身坐标所在的可行区域 ;

[0118] 如图 2 和图 3 所示, 待定位节点 N_a 根据自身获得的一组参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} , 获得自身坐标的一个约束方环 BSR_{ai}, 图 2 中 i = 1, 图 3 中 i = 2 ; 如图 4 所示, 通过求解所有约束方环的交集, 即可得到 N_a 坐标 X_a 的可行区域 FR_a ; 所述约束方环指待定位节点 N_a 根据一组参考信息确定出的自身坐标所在的一个方环区域 ;

[0119] 以 i = 1 和 i = 2 为例, 求解待定位节点 N_a 的可行区域 FR_a 的具体步骤如下 :

[0120] (1) 待定位节点 N_a 根据自身获得的参考信息 REF_i = {X_i, d_{ai}, D_a, S_{ai}, H_{ai}} , 确定自身坐标的所在的圆环区域 C_{ai} ;

[0121] 分为以下两种情况 :

[0122] ①如图 2 所示, 待定位节点 N_a 和信标节点 N_i 相邻, 这时 d_{ai} 为两节点间的测量距离, 测距误差 ε_{ai} ∈ (-α \hat{d}_{ai} , α \hat{d}_{ai}), $\hat{d}_{ai} = \|X_a - X_i\|_2$ 为两节点间的欧式距离, α 为测距误差比例

系数;根据参考信息 REF_1 , 可以得出, N_a 处在以 X_1 为中心, $R_{a1} = d_{a1}/(1-\alpha)$ 为外径, $r_{a1} = d_{a1}/(1+\alpha)$ 为内径的圆环区域 C_{a1} 中;

[0123] ②如图 3 所示, 如果 N_a 和信标节点 N_2 不相邻, 但两节点可以通过多跳的方式相互通讯, 这时 d_{a2} 为两节点间的多跳距离;根据参考信息 REF_2 , 可以得出, N_a 又处在以 $R_{a2} = d_{a2}/(1-\alpha)$ 为外径, $r_{a2} = R$ 为内径的圆环区域 C_{a2} 中, 这里 R 为节点的通讯半径;

[0124] (2) 如图 2 和图 3 所示, 分别做出 C_{ai} 外圆的外接正方形 S_{ai}^o 和内圆的内接正方形 S_{ai}^I , $O_{ai} = 2R_{ai}$ 和 $I_{ai} = \sqrt{2}r_{ai}$ 分别为 S_{ai}^o 和 S_{ai}^I 的边长;这样, 由 S_{ai}^o 和 S_{ai}^I 所围成的区域即为 N_a 的一个约束方环(图 2 的竖条区域和图 3 的横条区域), 记作 BSR_{ai} ;

[0125] (3) 如图 4 所示, 当 N_a 求出所有约束方环 BSR_{ai} 后, 通过求解所有约束方环的交集即可得到待定位节点 N_a 的坐标 X_a 的可行区域 FR_a (图 4 的网格区域);

[0126] 步骤四、根据步骤三得到的可行区域, 待定位节点通过网格划分的方式获取自身位置坐标的一组样本;

[0127] 设定坐标估计网格粒度 g_a , 根据 g_a 将 N_a 的可行区域 FR_a 划分为 s_a 个子网格, 然后以每个子网格的中心坐标作为 N_a 位置坐标 X_a 的样本取值 $X_a(k)$, k 为自然数, $k = 1, 2, \dots, s_a$, 通过这种方式获得的样本集合:

$$[0128] \quad \Omega_a = \{X_a(1), X_a(2), \dots, X_a(s_a)\} \quad (10)$$

[0129] 所述坐标估计网格粒度指将待定位节点坐标的可行区域划分成的子网格的大小, 一般用子网格的边长与节点通讯半径的比值来表示;

[0130] 步骤五、在步骤四得到的样本中, 待定位节点搜索自身位置坐标的近似最优解;

[0131] 在步骤四得到的 Ω_a 中, 通过遍历的方式搜索使模型 (9) 中目标函数取值最小的样本点 $X_a(\min)$, 将其作为待定位节点 N_a 初始估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$, 即 $\hat{X}_a^{(0)} = X_a(\min)$;

[0132] 步骤六、通过邻居节点间的协作, 所有待定位节点求精自身的估计坐标;

[0133] 通过步骤五得到待定位节点 N_a 的初始估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$ 后, 如果不需要进一步提高定位精度, 则定位过程结束, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(0)}$;如果需要进一步提高定位精度, 则进入节点协作求精阶段, 通过相邻节点间的协作, 得到待定位节点 N_a 求精后的估计坐标 $\hat{X}_a^{(1)}$, 输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$;

[0134] 节点协作求精的具体步骤如下:

[0135] (1) 设节点协作求精的迭代次数 $T = 0$;

[0136] (2) 所有信标节点向网络中广播自身的坐标, 所有待定位节点向网络中广播自身的最新估计坐标, 待定位节点 N_a 根据自身邻居节点广播的坐标或估计坐标和节点间的测量距离, 建立如下坐标求精目标函数:

$$[0137] \quad \hat{X}_a^{(1)} = \arg \min_{X_a} \sum_{j=1}^{K_a} w_{aj} (\|X_a - \hat{X}_j^{(0)}\| - d_{aj})^2 \quad (11)$$

[0138] 其中, $\hat{X}_j^{(0)} (j = 1, 2, \dots, K_a)$ 为 N_a 的邻居节点 N_j 广播的坐标, K_a 为 N_a 邻居节点的数目, d_{aj} 为 N_a 到 N_j 的测量距离, w_{aj} 为距离约束条件 $\{\hat{X}_j^{(0)}, d_{aj}\}$ 的权重; w_{aj} 的取值方式同邻居节点 N_j 广播的坐标 $\hat{X}_j^{(0)}$ 的精度有关, 当 N_j 为信标节点时, $\hat{X}_j^{(0)}$ 的精度较高, 此时 w_{aj} 的权重最大; 当 N_j 为待定位节点时, 可以根据 N_j 初始坐标估计阶段可行区域 FR_j 的面积来判断 $\hat{X}_j^{(0)}$ 的

估计精度,进一步得到 w_{a_j} 的取值;

[0139] (3) 以 N_a 的估计坐标 $\hat{X}_a^{(0)}$ 为中心,边长为 1 的正方形作为节点 N_a 坐标求精的可行区域 FR_a^r ;设定 N_a 坐标求精网格粒度 r_a ,一般 $r_a \leq g_a$;所述坐标求精网格粒度指将待定位节点坐标求精的可行区域划分成的子网格的大小,一般用子网格的边长与节点通讯半径的比值来表示;根据 r_a 将 FR_a^r 划分为 k_a 个子网格,以每个子网格中心的坐标作为 N_a 坐标求精的样本 $X_a(k)$, k 为自然数, $k = 1, 2, \dots, k_a$;通过这种方式获得 N_a 坐标求精的样本集合:

$$[0140] \quad \Theta_a^r = \{X_a^r(1), X_a^r(2), \dots, X_a^r(k_a)\} \quad (12)$$

[0141] 其中, k_a 为坐标求精样本的数量;

[0142] (4) 遍历 Θ_a^r 得到目标函数 (11) 的近似最优解 $\hat{X}_a^{(1)}$,同时,令 $T = T+1$;

[0143] (5) 判断节点协作求精迭代停止条件 $\|\hat{X}_a^{(1)} - \hat{X}_a^{(0)}\|_2 \leq \varepsilon$ 是否成立, ε 通常取大于 0 且小于 r_a 的一个实数;

[0144] 若条件成立,节点协作求精停止, $\hat{X}_a^{(1)}$ 即为待定位节点 N_a 的求精后的估计坐标,输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$;否则,转到下一步;

[0145] (6) 判断 $T \geq T_{\max}$ 是否成立, T_{\max} 为设定的节点协作求精的最大迭代次数;

[0146] 如果成立,节点协作求精停止, $\hat{X}_a^{(1)}$ 即为待定位节点 N_a 求精后的估计坐标;否则,令 $\hat{X}_a^{(0)} = \hat{X}_a^{(1)}$,返回到步骤 (2),直到节点协作求精停止,最后输出 $\hat{X}_a = \hat{X}_a^{(1)}$ 。

[0147] 实施例:

[0148] 如图 5 所示,在 $200m \times 200m$ 平面区域内部署 200 个传感器节点构成 H 型的各向异性无线传感器网络,所有节点的通讯半径都为 25.6m,此时网络的连通度为 9。图 5 中,实心圆点代表信标节点,比例为 10%,ID 为 1-20;空心圆圈代表待定位节点,比例为 90%,ID 为 21-200;节点间的实线代表两个节点间可以直接通讯,实线长度表示两个节点间的欧式距离;所有节点都具备测距功能,测距误差比例系数为 0.1,信息帧的生命周期 TTL 为 5。

[0149] 在图 5 所示的网络环境下,使用本发明一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法进行节点多跳自定位;未经过节点协作求精时,所有待定位节点的定位误差概率分布情况如图 6 所示,图中的深色曲线为核平滑密度估计拟合曲线,近似为正态分布曲线;由图 6 可以看出,未经过节点协作求精时,使用本发明多跳定位方法得到的所有待定位节点的平均定位误差为节点通讯半径的 12.7%,最大定位误差不超过节点通讯半径的 60%;经过节点协作求精后,所有待定位节点的定位误差概率分布情况如图 7 所示;由图 7 可以看出,经过节点协作求精后,所有待定位节点的平均定位误差降到节点通讯半径的 5.8%,最大定位误差不超过节点通讯半径的 40%;相对于现有的典型多跳定位方法,本发明方法在节点定位精度和网络拓扑的自适应方面有明显的提高。

[0150] 通过上述分析,本发明一种轻量级的无线传感器网络多跳定位方法,能够减小无线传感器网络节点定位过程中的计算消耗,提高定位精度,对不规则网络拓扑的自适应能力较强,可以有效解决大规模无线传感器网络的节点自定位问题。

[0151] 最后所应说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本发明技术方案的精神和范围。

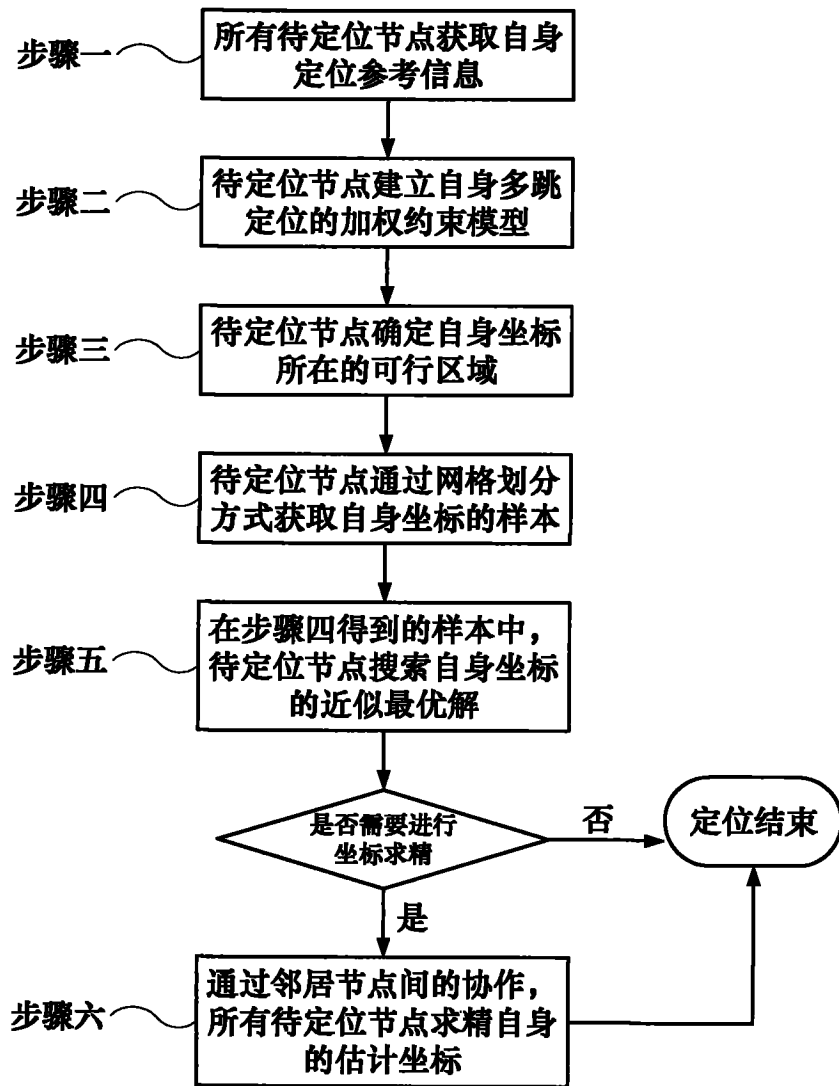


图 1

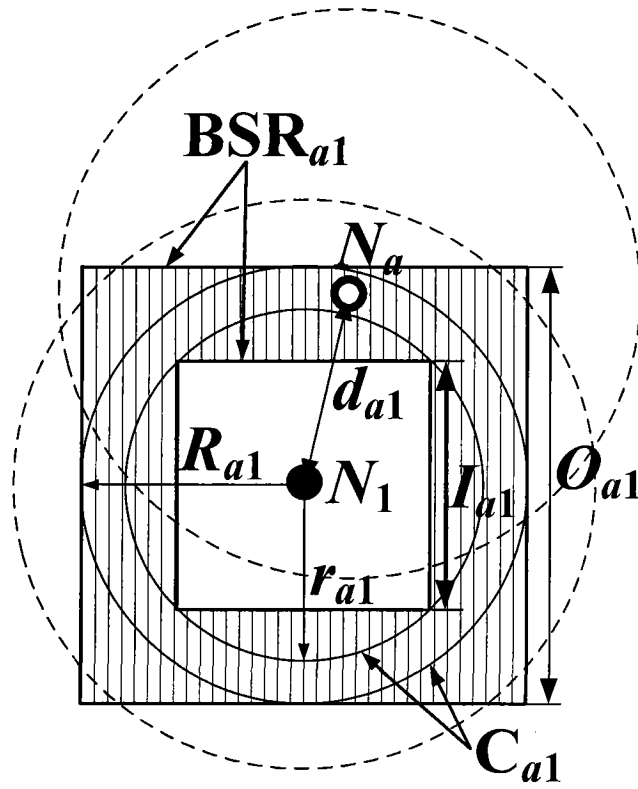


图 2

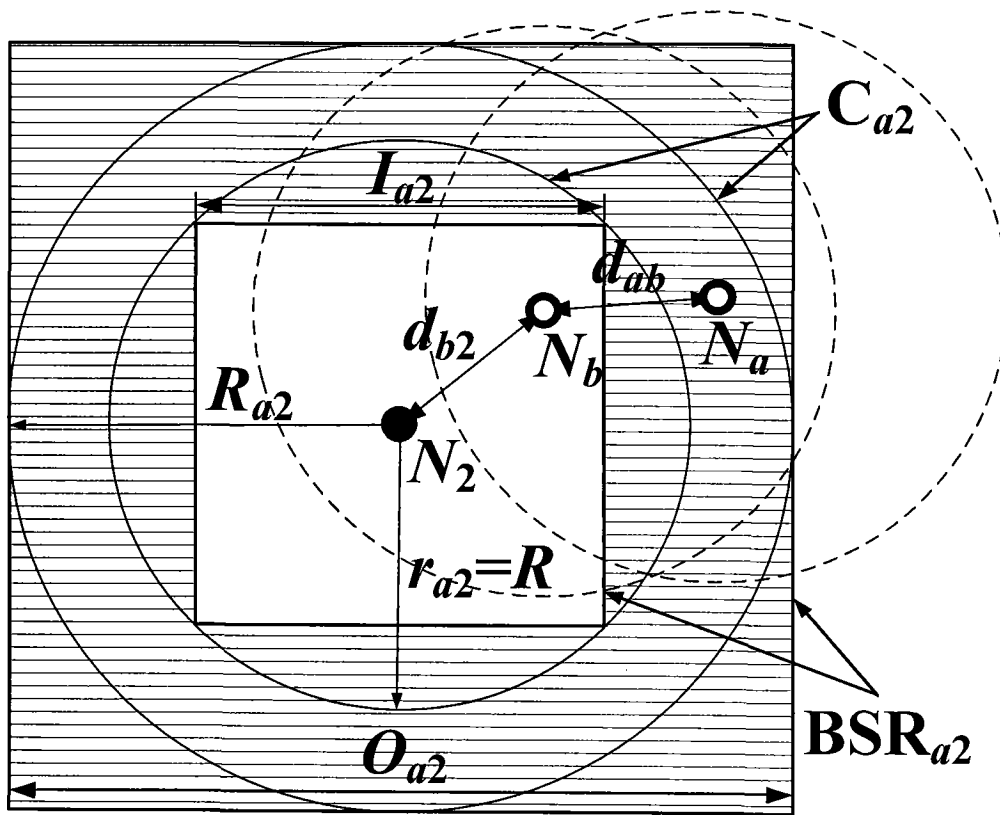


图 3

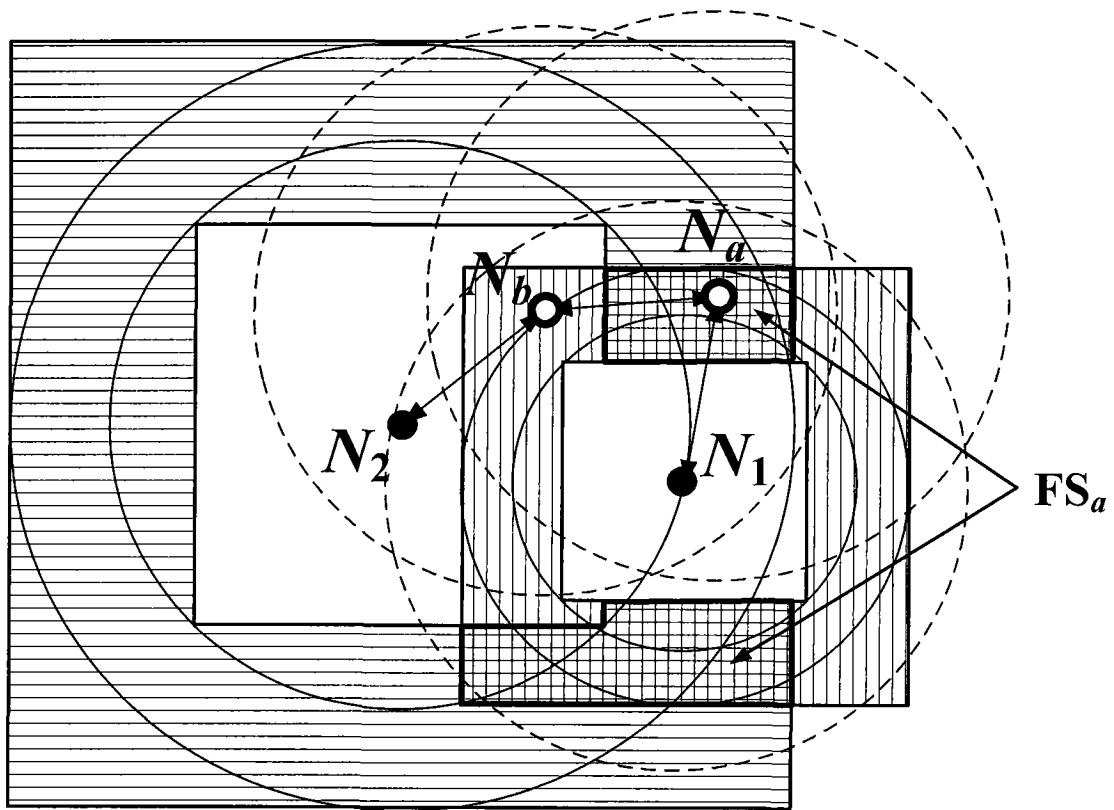


图 4

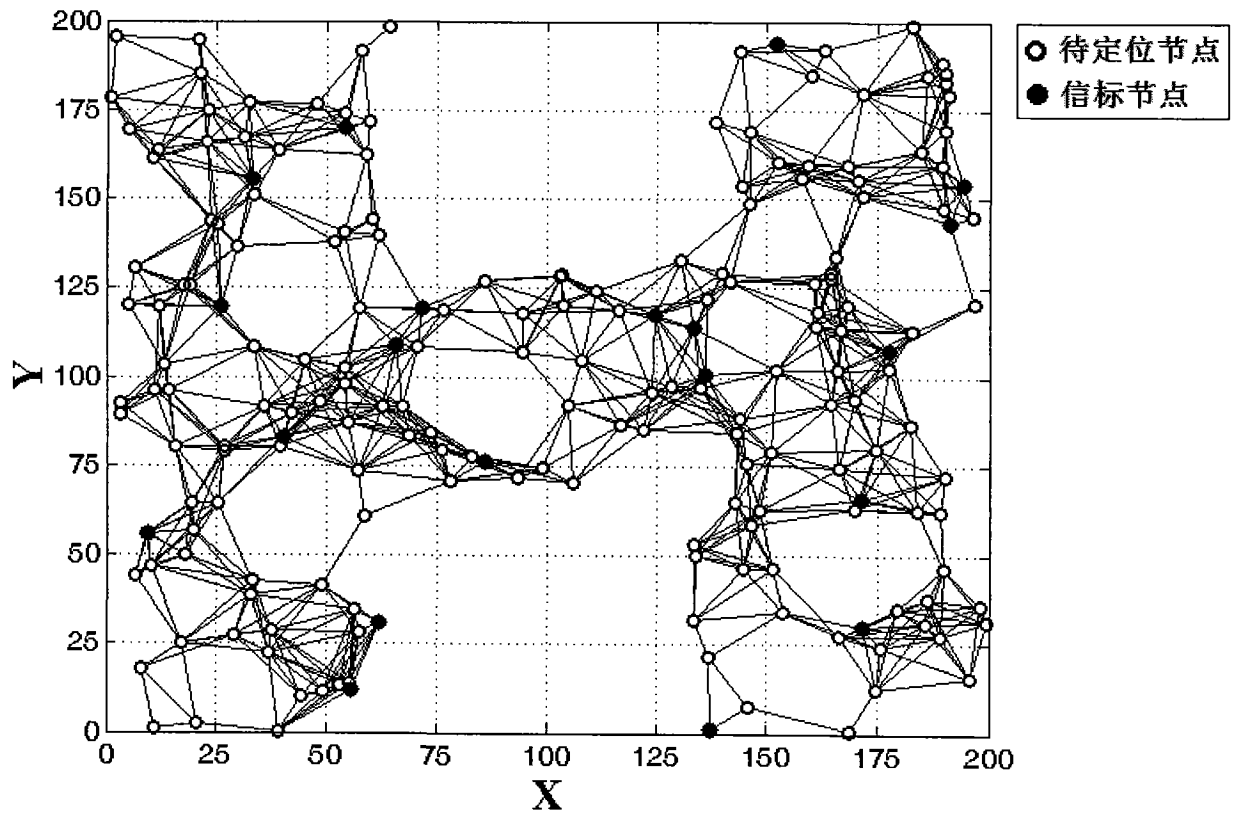


图 5

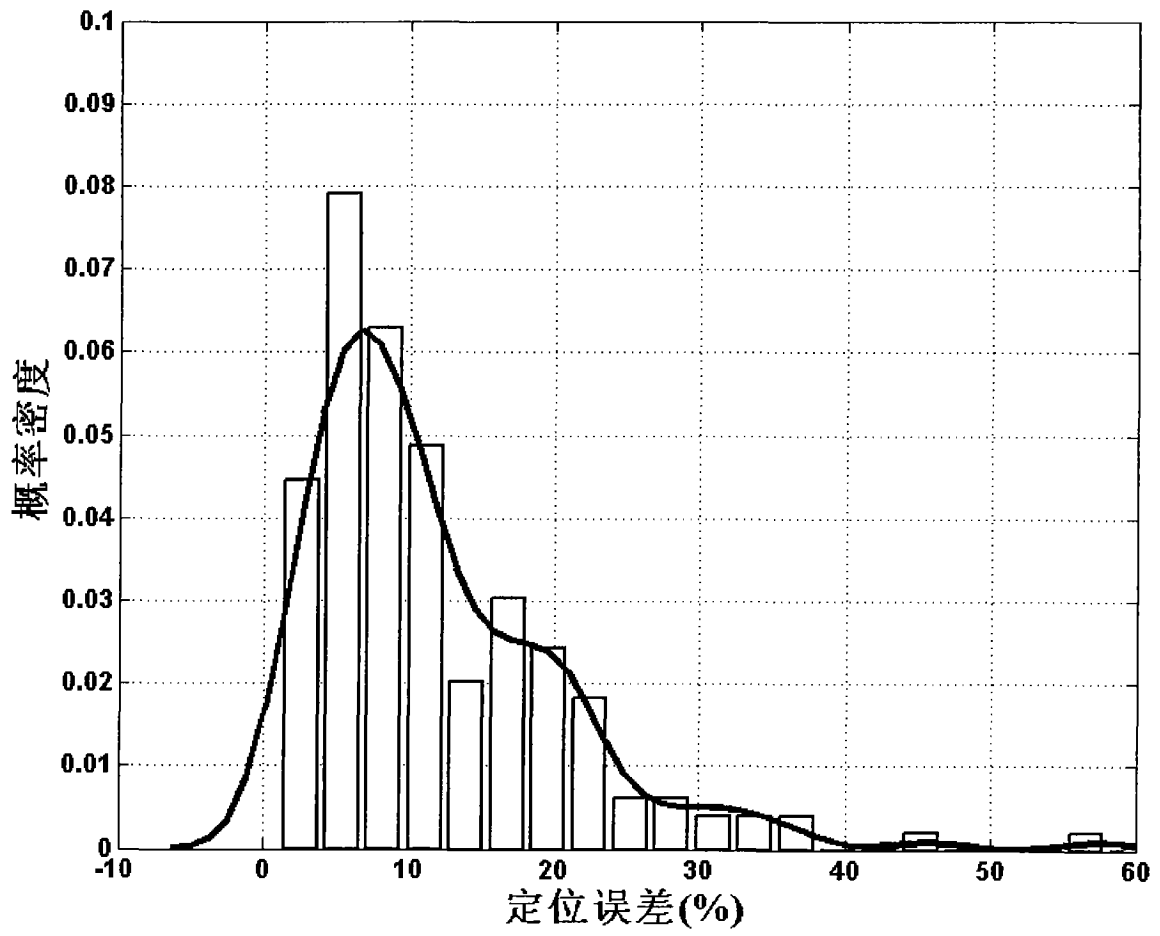


图 6

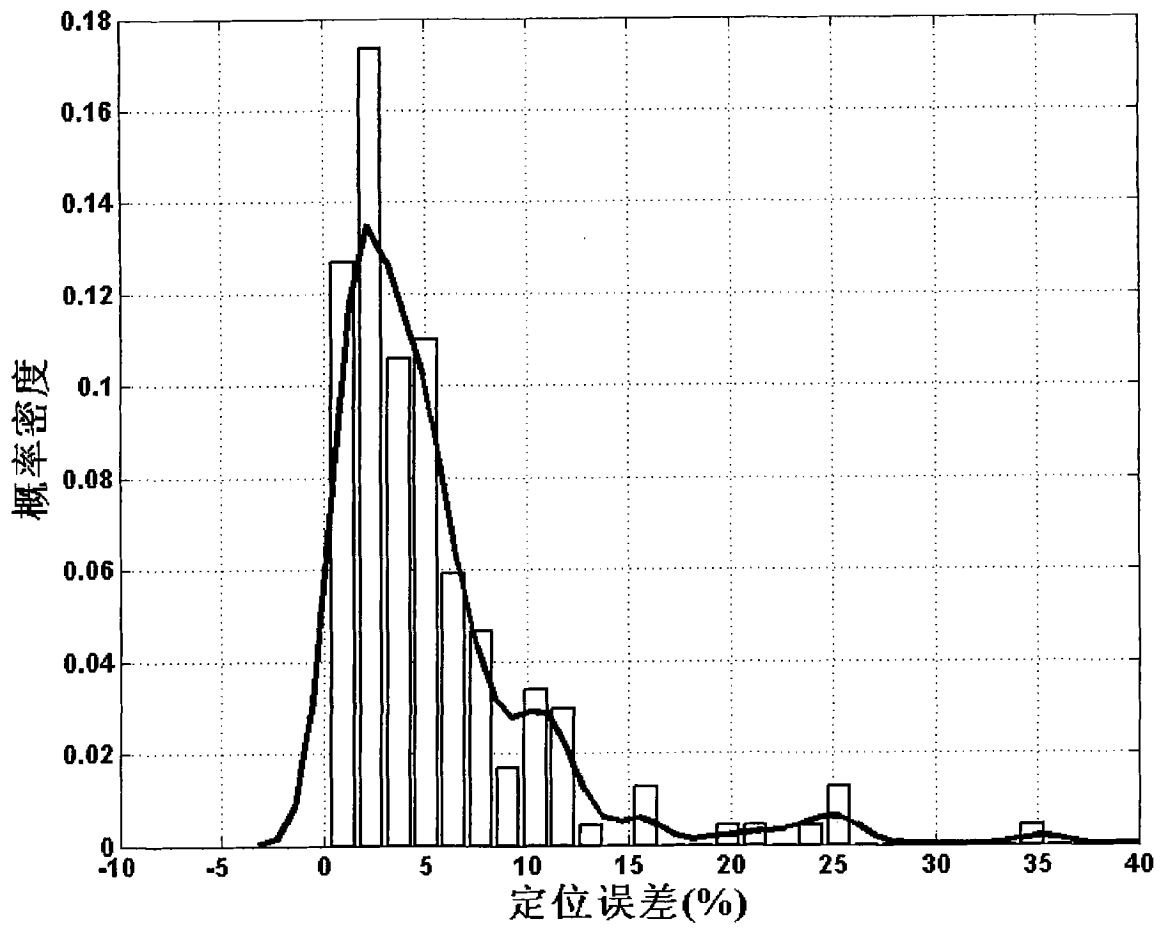


图 7