

基于精细化梯度的传感器网络节点距离测量

郑明才^{1,3} 张大方^{1,2} 赵小超³

(湖南大学计算机与通信学院 长沙 410082)¹ (湖南大学软件学院 长沙 410082)²

(湖南第一师范学院信息科学与工程系 长沙 410205)³

摘 要 定位在无线传感器网络中具有极其重要的作用,而距离测量往往是定位的前提。寻求低成本、低开销、高精度的分布式传感器网络节点距离测量算法是本文的主要目的。根据无线传感器网络最小跳数梯度场中节点精细化梯度值的分布特征,提出了一种基于精细化梯度的传感器网络节点距离测量方法 DV-FGI。与 DV-hop 算法相比,DV-FGI 保留了 DV-hop 算法低成本、低开销的优点,具有更高的测量精度,并将节点距离测量分辨率从节点有效通信半径提高至网络节点间距。理论分析及仿真结果表明,该算法在节点密集分布的无线传感器网络中具有很好的效果。

关键词 无线传感器网络,最小跳数梯度场,精细化梯度,距离测量,精度

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Distance Estimating Algorithm Based on Fine-grain Gradient in Wireless Sensor Networks

ZHENG Ming-cai^{1,3} ZHANG Da-fang^{1,2} ZHAO Xiao-chao³

(School of Computer and Communications, Hunan University, Changsha 410082 China)¹

(School of Software, Hunan University, Changsha 410082, China)²

(Department of Information Science and Technology, Hunan First Normal University, Changsha 410205, China)³

Abstract Localization takes an important role in wireless sensor networks, while distance measuring is usually the pre-condition of tracking or positioning. Finding a distance-measuring algorithm with low cost, low overhead and high precision is the main intension of this paper. In this paper, derived from the distributing characteristics of node's fine-grain gradient value in wireless sensor networks' minimum hop gradient field, a way based on the fine-grain gradient to estimate the distance between nodes, namely DV-FGI, was presented. Compared with the DV-hop algorithm, the measuring precision of DV-FGI is improved largely at the nearly same cost and overhead, and the resolution ratio of measuring is improved from communication radio range to the distance interval between neighbor nodes. The theoretical analysis and simulation results validate that the method is quite effective in the wireless sensor networks deployed with dense nodes.

Keywords Wireless sensor networks, Minimum hop gradient field, Fine-grain gradient, Distance estimating, Degree of accuracy

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)作为主观世界与物理世界间的联系纽带,广泛应用于搜救、赈灾、目标追踪等基于位置的应用中。节点定位在无线传感器网络中具有十分重要的作用。离开位置信息,传感器网络中的某些测控信息甚至可能变得毫无意义。

距离测量是节点定位的基本手段,无线传感器网络中的距离测量包括两种情况,一是基于目标追踪的距离测量,另一是节点间的距离测量,后者往往是前者的先决条件。根据是否需要采用物理手段直接测量两节点间的距离,无线传感器网络中的节点距离测量方法可分为两大类:直接测距和间接测距。直接测距通过增加节点的物理功能模块(如能量感知模块、定时器模块等)来直接测量节点间的距离,测得的距离

值精确度可能较高,但增加物理功能模块成本高、功耗大,在节点密集分布、节点能量严格受限的大规模无线传感器网络中不是十分适用;间接测距不需增加节点的物理功能模块,而是通过多个节点的协同工作挖掘网络中的可用信息(如最小跳数值等)来估算节点间的距离,估计的距离值精度可能不太高,但节点可做到价格低廉、耗能低等,被普遍认为是一种性价比高的方法,如若能进一步提高测量精度,间接测距方法将会有意义。

DV-hop 算法^[1]是间接距离测量的典型代表,其测量分辨率为节点有效通信半径(radio range, R),即“1 跳”(one hop)的距离,对于同跳层次内的不同节点的距离无法区分,因而测量精度不高。

到稿日期:2009-10-12 返修日期:2010-01-04 本文受湖南省科技计划项目(2009GK3076),湖南省教育厅科学研究项目(08C015,08C017),湖南第一师范校基金(XYS08N05)资助。

郑明才(1969—),男,博士生,副教授,主要研究方向为计算机网络、通信技术、信号处理, E-mail: dysfzmc@163.com; 张大方(1959—),男,博士,教授,博士生导师, CCF 高级会员,主要研究方向为可信系统与网络、容错计算、网络测试、软件容错、软件测试、网络安全、软件工程、电子政务; 赵小超(1971—),女,讲师,主要研究方向为计算数学、应用数学及仿真算法。

本文根据无线传感器网络最小跳数梯度场 (minimum hop gradient field, MHGF) 中的梯度化邻居节点数及邻居节点的最小跳数值 (minimum hop count, MHC), 计算出节点所有一跳范围内邻居节点的平均最小跳数值, 作为该节点的精细化梯度值 (fine-grain gradient value, FGV), 并找出节点的精细化梯度值与节点距汇聚节点/基准节点间径向距离的关系, 据此提出基于精细化梯度的节点距离测量方法 DV-FGI (distance vector based on ideal fine-grain gradient), 在 DV-hop 算法的基础上, 它将节点距离测量分辨率提高到节点间距 D_1 (distance interval between nodes), 不仅极大地提高了测量精度, 也提供了一种节点间彼此区分的途径, 而且几乎保留了 DV-hop 算法的所有优点。

1 相关工作

定位与距离测量是相辅相成, 互为辅助的。全球定位系统 (global position system, GPS) [2] 是目前应用最广泛的定位和距离测量系统, 但其大体积、高成本、高能耗以及需要基础设施的特点不适合用于有小体积、低成本、低能耗要求和自组织特性的无线传感器网络, 而且不适合用于室内等场所的定位。

直接距离测量依靠节点自身具有的物理测距手段进行测距, 如 TOA (time of arrive) 算法 [3] 通过给节点增加定时器模块和声波收发系统, 靠测得的声波到达时间和声波传播速度来测量节点间的距离, 这种方法除需给节点增加上述硬件模块外, 还要求节点间的时间高度同步; TDOA (time difference of arrive) 算法 [4] 通过测量两种不同频率射频信号的到达时间差和这两种射频信号的已知传播速度来测量距离, 这种方法同样要求节点配置定时器模块和多频率无线收发模块, 对硬件的要求高; 基于信号强度指示 RSSI (received signal strength indicator) 的距离测量算法 [5] 根据收发节点间的信号传播损耗来计算节点间的距离, 由于受信号传播环境中温度、障碍物以及信号传播模式的影响大, 这种方法在实用中若要达到高测量精度尚存在一定难度, 而且节点需配置高精度能量感知模块, 实现成本高。文献 [3-5] 中描述的距离测量算法还存在一个不足, 亦即当待测节点间的距离较近时, 受物理模块分辨率的限制, 存在“测不准”的情况, 测量误差大。总之, 直接测距方法不仅需要增加节点的物理功能模块, 而且计算也较为复杂, 导致代价大。而间接测距方法在不增加网络节点物理功能模块的情况下, 依靠网络中各节点的协同工作进行节点间距离的估算, 更有利于实际应用, 其典型代表是 DV-hop 算法和质心算法 [6]。质心算法通过计算大量信标节点形成区域的中心作为节点的位置, 节点位置确定后, 节点间的距离不难求得。质心算法需要的信标节点多, 节点间信息交互导致的通信开销大, 有一个逐步求精的过程, 计算量大, 其通用性受到一定限制。

多跳测距 DV-hop 算法是低开销距离估算的典型代表, 该算法先根据两个锚节点/信标节点 (位置已知或可知的节点) 间的已知距离及其最小跳数间隔计算出每跳平均距离 \bar{R} , 再根据 \bar{R} 及待测节点距基准节点的最小跳数值 MHC 计算出待测节点距该基准节点的距离 (为 $MHC * \bar{R}$)。由此可见, DV-hop 算法的测距分辨率为节点有效通信半径 R , 测距精度不高, 不能将网络 MHGF 中同跳层次内不同径向距离的节点

彼此区分开来。文献 [11] 提出一种传感器网络感知数据的精细化梯度汇聚模型 FGS (fine-grain gradient sinking), 即用精细化梯度值区分节点区域, 作为数据汇聚路由的细化依据以优化网络数据流分布, 使网络数据流具有全网外疏内密的特征。

本文提出的 DV-FGI 测距方法, 根据 MHGF 梯度场中节点的梯度化邻居节点信息形成节点的精细化梯度值, 再根据节点精细化梯度值与节点位置的关系进行传感器网络节点间距离的分布式自测量, 在 DV-hop 算法的基础上将节点距离测量分辨率提高到节点间距 D_1 , 在节点密集分布的无线传感器网络中极大地提高了距离测量精度。发现了 MHGF 中节点精细化梯度值与节点位置的关系以及边界精细化梯度值的理论估算值, 并将其用于节点距离测量。在基本不增加开销的前提下极大提高节点距离测量精度是本文的主要贡献。

2 最小跳数梯度场

DV-hop 算法及 DV-GFI 算法均基于最小跳数梯度场 MHGF。无线传感器网络是自组织网络, 网络节点在需要时以各种各样的方式随机布撒, 随机布撒的节点在网络覆盖区域内近似服从均匀分布 [7], 节点布撒完成后相互唤醒, 自组成网。在最小跳数路由无线传感器网络中, 各节点处于同一逻辑平面内, 地位平等, 网络的组织及信息传送过程分为查询分组 (interesting packet) 传送和数据分组 (data packet) 传送两个阶段 [8], MHGF 在查询分组传送阶段形成。

2.1 最小跳数梯度场建立

在最小跳数路由无线传感器网络中, Sink 节点 (网关节点/汇聚节点) 以受限 flooding 方式 (受节点最小跳数值的约束) 广播查询分组 (即“兴趣”分组 INTEREST), 以搜取所需数据或通知相关数据源节点启动相应的测控任务 [9]。在查询分组传播过程中, 一方面在网络中分配测控任务, 另一方面自动在网络中建立起数据分组传送阶段所需要的最小跳数路由梯度场 MHGF。建立的 MHGF 以 sink 节点为核心, 逐跳向外扩散, 形成以 sink 为圆心的近似同心圆簇, 其几何结构图如图 1 中非阴影部分所示。

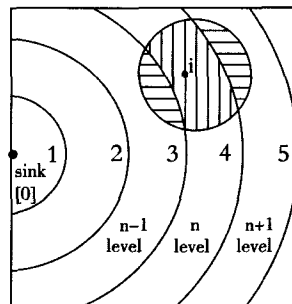


图 1 MHGF 及节点 i 的梯度化邻居节点分布

2.2 节点位置与 MHGF 的关系特征

MHGF 一经建立, 节点便被圈定在不同的梯度层次内 (梯度化), 不同梯度层次内的节点距 sink 节点的距离不同, 这正是 DV-hop 算法的依据, 但相同梯度层次内的节点无法根据已获取的最小跳数值区分彼此距 sink 节点距离的不同, 有待寻找其它依据。通过分析某节点 (如图 1 中的 i 节点) 的梯度化邻居节点信息, 不难发现如下特征:

① 如果将节点 i 的最小跳数值记为 $H(i)$, 则其邻居节点

具有的最小跳数值存在 3 种情况,即 $H(i)-1, H(i), H(i)+1$ 。

② 节点 i 距 sink 节点的距离不同时,虽然其邻居节点总数可能相同,但其分布在不同梯度层次内的邻居节点数不同。

③ 随着节点 i 距 sink 节点距离的增加,节点 i 在 $H(i)-1$ 跳层次内的邻居节点数减小,在 $H(i)+1$ 跳层次内的节点数增大。

综合上述特征不难发现:在节点近似均匀分布的无线传感器网络中,距 sink 节点距离不同的节点,其邻居节点的平均最小跳数值不同,且随着径向距离增加,邻居节点的平均最小跳数值增大。这一特征将在后文的定理 1 中予以证明。

3 DV-FGI 节点距离测量算法

3.1 前提条件和说明

无线传感器网络是一类面向应用的复杂自组织网络,针对不同具体应用的网络都可能或多或少地呈现出各自与众不同的特征。为便于分析,对理论模型做如下假设和说明:

1. 网络节点近似均匀分布,并设节点密度 ξ (个/ m^2) 足够大,能保证网络具有足够高的连通性。
2. 全网节点具有近似统一的有效通信半径。

3.2 相关定义和术语

本文引入如下定义和术语:

定义 1(下行) 无线传感器网络中的信息传送具有方向性,将 sink 节点向网络广播查询分组的过程称为下行(trans-
porting downward)。

定义 2(梯度化邻居节点) 在查询分组按节点最小跳数值传送的过程中,直接将查询分组传递给 i 节点的上跳层次内的节点称为 i 节点的下行源端邻居节点,其数量记为 $N_{DS}(i)$,源端邻居节点区域及面积记为 $A_{DS}(i)$;直接收到由 i 节点转发的下跳层次内的节点称为下行目的端邻居节点,其数量记为 $N_{DD}(i)$,下行目的端邻居节点区域及面积记为 $A_{DD}(i)$;在节点 i 通信半径覆盖范围内的所有节点称为节点 i 的覆盖邻居节点,其数量记为 $N(i)$,覆盖邻居节点区域及面积记为 $A(i)$;与节点 i 具有相同最小跳数值的覆盖邻居节点称为节点 i 的同跳覆盖邻居节点,其数量记为 $N_H(i)$,同跳覆盖邻居节点区域及面积记为 $A_H(i)$ 。

定义 3(梯度场边界及边界节点) 在最小跳数梯度场中,相邻跳梯度层次间的分界线称为边界(bound),边界上的点为具有较小最小跳数值的节点,称为边界节点;对于某个梯度层次,离 sink 节点近的边界称为内边界(in-bound),离 sink 节点远的边界称为外边界(out-bound)。最小跳数梯度场第 n 跳边界对应的最小跳数值记为 $H_B(n)$ 。

定义 4(网络边沿节点) 网络中的某个节点,如果其无下行目的端邻居节点,则称该节点为网络边沿节点;如果其存在下行目的端邻居节点,但其覆盖邻居节点中存在网络边沿节点,则称该节点为近网络边沿节点。

3.3 节点精细化梯度值

在 MHGF 建立过程中,节点被圈定在相应的梯度层次内,节点的覆盖邻居节点因节点在 MHGF 中的位置不同而在相邻跳层次内有不同的分布,根据 2.2 节中给出的邻居节点分布特征,将节点覆盖邻居节点的平均最小跳数值作为节点的精细化梯度值,可表示为:

$$H_F(i) = \frac{N_{DS}(i)(H(i)-1) + N_H(i)H(i) + N_{DD}(i)(H(i)+1)}{N_{DS}(i) + N_H(i) + N_{DD}(i)} \quad (1)$$

关于节点 i 的精细化梯度值,可以由两种途径获得:一是在 MHGF 形成过程中,节点通过监听(overhearing)并统计其邻居节点信息,由式(1)计算获得;二是在节点近似均匀分布的无线传感器网络中,根据几何结构学知识由各类邻居节点区域面积和网络节点密度估算而得,可表示为:

$$N_{DS}(i) = A_{DS}(i)\xi \quad (2)$$

$$N_H(i) = A_H(i)\xi \quad (3)$$

$$N_{DD}(i) = A_{DD}(i)\xi \quad (4)$$

$$N(i) = N_{DS}(i) + N_H(i) + N_{DD}(i) = A(i)\xi = \pi R^2 \xi \quad (5)$$

分析精细化梯度值与 MHGF 间的联系与区别,可得由下述定理描述的对于节点距离测量有用的结论。

定理 1 在节点均匀分布的最小跳数梯度场中,随节点 i 距汇聚节点距离的增加,节点 i 的精细化梯度值单调增大。

证明:根据几何结构学知识与节点精细化梯度值定义,有:

$$H_F(i) = H(i) + \frac{A_{DD}(i) - A_{DS}(i)}{\pi R^2}$$

又,随节点距汇聚节点的距离 $d \uparrow$,有 $H(i) \uparrow, A_{DD}(i) \uparrow, A_{DS}(i) \downarrow$ 。

所以,随 $d \uparrow$,有 $H_F(i) \uparrow$,定理得证。

定理 2 在节点均匀分布的最小跳数梯度场中,位于最小跳数梯度场边界上的节点即边界节点的精细化梯度值由边界节点的最小跳数值唯一决定。

证明:当节点 i 位于最小跳数梯度场第 $H(i)$ 跳边界上时,节点距汇聚节点的距离为 $d = H(i)R$,节点在相邻各跳层次内的覆盖面积为 $A_{DS}(i) = 0$,

$$A_H(i) = R_3^2 \arcsin\left(\frac{y_3}{R_3}\right) + y_3 \sqrt{R_3^2 - y_3^2} + R^2 \arcsin\left(\frac{y_3}{R}\right) +$$

$$y_3 \sqrt{R^2 - y_3^2} - 2dy_3$$

$$A_{DD}(i) = \pi R^2 - A_H(i)$$

式中, $R_3 = d = H(i)R, y_3 = \sqrt{R_3^2 - \left(\frac{d^2 + R_3^2 - R^2}{2d}\right)^2}$ 。

根据上述覆盖区域面积及精细化梯度值定义,求得此时 i 节点的精细化梯度值为:

$$H_F(i) = H(i) + 1 - \frac{1}{\pi} \left(H^2(i) \arcsin \frac{\sqrt{4H^2(i)-1}}{2H^2(i)} + \arcsin \frac{\sqrt{4H^2(i)-1}}{2H(i)} - \frac{\sqrt{4H^2(i)-1}}{2} \right)$$

由此可见,边界节点的精细化梯度值只与其最小跳数值 $H(i)$ 直接相关,定理得证。

若用 $H_{FBI}(n)$ 表示第 n 跳边界节点的精细化梯度理论估算值,定理 2 描述的结论可表示为:

$$H_{FBI}(n) = n + 1 - \frac{1}{\pi} \left(n^2 \arcsin \frac{\sqrt{4n^2-1}}{2n^2} + \arcsin \frac{\sqrt{4n^2-1}}{2n} - \frac{\sqrt{4n^2-1}}{2} \right) \quad (6)$$

3.4 节点位置与精细化梯度值的关系

节点精细化梯度值与节点距汇聚节点径向距离的关系曲线如图 3(a) 所示。由定理 1 可知, MHGF 中节点的精细化梯度值随节点距汇聚节点距离的增加单调增大,但不能保证是

线性增大;MHGF 中梯度层次边界上的节点距汇聚节点的距离近似等于节点有效通信半径 R 的整数倍,倍数为节点拥有的最小跳数值,边界节点的精细化梯度值可经“1 跳”范围查询获得,也可由定理 2 估算而得。

测量网络节点间距离时,根据节点统计出的自身精细化梯度值,借助不同的数值计算方法,可计算出节点距汇聚节点的距离。采用不同的数值计算方法得到的结果精度可能不同,网络节点开销不同,对网络节点的资源要求也有所不同。无线传感器网络中的节点资源往往是严格受限的,简化节点的处理操作有利于网络综合性能的提高,本文提出的 DV-FGI 算法通过分段线性化,简化传感器网络节点距离测量算法,既可防过度地误差积累,又极大地降低了计算开销。在估算节点间距离时,考虑到节点 i 所在梯度层次的内、外边界距汇聚节点的距离确定可知, $(H(i)-1)R$ 和 $H(i)R$ 的边界精细化梯度值分别为 $H_{FB}(H(i)-1)$ 和 $H_{FB}(H(i))$, 节点本身的精细化梯度值 $H_F(i)$ 在内、外边界精细化梯度值间单调增加,可将节点精细化梯度值与节点距汇聚节点的距离关系按 MHGF 的梯度层次分段线性化,分段线性化后, $H(i)$ 跳层次内的节点 i 距 sink 节点的距离可表示为:

$$d_{\text{sink-}i} = (H(i)-1)R + \frac{H_F(i) - H_{FB}(H(i)-1)}{H_{FB}(H(i)) - H_{FB}(H(i)-1)}R + \Delta \quad (7)$$

式中, $0 \leq \frac{H_F(i) - H_{FB}(H(i)-1)}{H_{FB}(H(i)) - H_{FB}(H(i)-1)} \leq 1$, Δ 为测量距离误差。

在具体实现时,对于式(7)中各种量值的获取可能有多种途径,不同的途径在网络开销方面往往有较大差别。对于节点自身的精细化梯度值,节点可通过“偷听”机制统计而得,对于节点所在层次内、外边界的精细化梯度值,节点可通过“查询”机制获得,但会增加网络及节点的通信开销,在节点能源严格受限、信道资源共享且有限的无线传感器网络中,通信开销是一个应该极力降低的指标。由定理 2 可知, MHGF 边界的理论精细化梯度值只与其中节点的最小跳数值 $H(i)$ 直接相关,若用边界精细化梯度估算值 $H_{FBI}(H(i)-1)$ 和 $H_{FBI}(H(i))$ 代替查询值,可以极小的计算或存储开销换取通信开销的降低,这是采用 DV-FGI 算法的目的。用 DV-FGI 算法获得的节点距离可表示为:

$$d_{\text{sink-}i} = (H(i)-1)R + \frac{H_F(i) - H_{FBI}(H(i)-1)}{H_{FBI}(H(i)) - H_{FBI}(H(i)-1)}R + \Delta \quad (8)$$

用边界精细化梯度估算值代替查询值,有两方面的好处,一是可以降低通信开销,二是可以解决网络边沿节点或近边沿节点查询边界精细化梯度值时得不到正确结果的问题,还可以辅助节点判断自身是否为网络边沿节点或近边沿节点。边界精细化梯度估算值与查询值的关系曲线如图 3(b)所示。

3.5 DV-FGI 算法描述

由式(8)可知,要测量无线传感器网络节点间的距离,需获取待测节点距参考节点的最小跳数值 $H(i)$ 、有效通信半径 R 、待测节点的精细化梯度值 $H_F(i)$,取得这些数据后,根据式(6)计算出或从节点预置表中查出相应边界的精细化梯度值 $H_{FBI}(H(i)-1)$ 和 $H_{FBI}(H(i))$ (采用预置表可节省计算开销、时间开销和通信开销,只增加少量存储开销),再由式(8)即可计算出节点间的距离。要获取有效通信半径 R ,网络中

需配置两个以上的锚节点/信标节点。本文提出的 DV-FGI 测距算法及其实现方法描述如下。

1) 确定有效通信半径 R

选定两个锚节点 anchor1 和 anchor2,以 anchor1 作为基准点,anchor2 作为待测点。Anchor1 广播控制分组建立以其作为基准点的 MHGF,在该 MHGF 建立过程中,anchor2 获取其最小跳数值 $H(\text{an}2)$,并监听其邻居节点信息,按式(1)计算出其精细化梯度值 $H_F(\text{an}2)$,按式(6)计算出或从节点预置的表中查出相应边界的精细化梯度值 $H_{FBI}(H(\text{an}2)-1)$ 和 $H_{FBI}(H(\text{an}2))$ 。anchor1 与 anchor2 间的距离已知或可知为 $d_{\text{an}1-\text{an}2}$,由式(8)可得有效通信半径 R 的估计值为:

$$\bar{R} = \frac{d_{\text{an}1-\text{an}2}}{H(\text{an}2)-1 + \frac{H_F(\text{an}2) - H_{FBI}(H(\text{an}2)-1)}{H_{FBI}(H(\text{an}2)) - H_{FBI}(H(\text{an}2)-1)}} \quad (9)$$

2) anchor2 向全网广播其测得的有效通信半径值 R ,供节点距离测量用

3) 确定待测节点间的最小跳数值 $H(i)$

以其中一个节点作为基准点,另一节点作为待测点,建立以基准点为核心的 MHGF,可得待测节点距相应基准点的最小跳数值 $H(i)$ 。

4) 确定待测节点具有的 $H_F(i)$ 以及 $H_{FBI}(H(i)-1)$ 和 $H_{FBI}(H(i))$

在第(3)步的 MHGF 建立过程中,待测节点监听其邻居节点信息,按式(1)计算出其精细化梯度值 $H_F(i)$,按式(6)计算出或从节点预置表中查出相应边界的精细化梯度值 $H_{FBI}(H(i)-1)$ 和 $H_{FBI}(H(i))$ 。

5) 计算节点间距离

可由式(8)计算出节点间距离,为:

$$d_{\text{sink-}i} = (H(i)-1)R + \frac{H_F(i) - H_{FBI}(H(i)-1)}{H_{FBI}(H(i)) - H_{FBI}(H(i)-1)}R + \Delta \quad (10)$$

3.6 锚节点的配置

由式(8)估计节点有效通信半径时,估计误差为:

$$\overline{\Delta R} = \frac{\Delta}{H(\text{an}2)-1 + \frac{H_F(\text{an}2) - H_{FBI}(H(\text{an}2)-1)}{H_{FBI}(H(\text{an}2)) - H_{FBI}(H(\text{an}2)-1)}} \quad (11)$$

根据式(11)可知,对于相同的距离误差 Δ , $H(\text{an}2)$ 越大时,有效通信半径的估计误差 $\overline{\Delta R}$ 越小,所以配置锚节点时使锚节点间的距离尽可能远,有利于提高有效通信半径估计的精度。这种配置也有利于实际操作,可将锚节点沿网络径向配置在靠近网络边缘处。

3.7 边沿节点和近边沿节点的距离测量

为减小通信开销, DV-FGI 距离测量算法中采用了边界精细化梯度值的估算值,而没有查询其实际值。当待测节点为边沿节点或近边沿节点时(如图 2 中的“test”节点),因其覆盖范围超出网络边界,其实际统计出的精细化梯度值比理想值偏低(网络边界外不存在实际邻居节点),直接按前述方法测量距离时,导致测量误差偏大。为解决这一问题,可在待测节点“test”的一跳范围的上跳层次内搜寻一精细化梯度值最小的下行源端邻居节点作为其“代测”节点(如图 2 中的节点“test¹”),根据节点精细化梯度值的分布特征可知,待测节点

“test”与“代测”节点“test'”间的距离近似为 R , 由此可得待测节点距基准点间的距离为:

$$d_{\text{sink-test}} = d_{\text{sink-test}'} + R \quad (12)$$

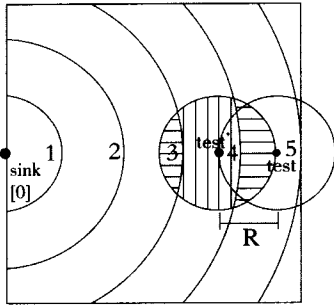


图2 边沿节点(或近边沿节点)与其代测节点

由于上述原因,节点在进行3.5节描述的测量过程前,先要判断自身是否是边沿节点或近边沿节点,如果是,应发送探测消息寻找“代测”节点,根据获取的“代测”节点的最小跳数值和精细化梯度值进行节点距离或有效通信半径的估算,在这种情况下,会增加一定量的通信开销。节点是否为边沿节点或近边沿节点,可有各种不同的判断方法,如:边沿节点可根据监听其是否存在目的端邻居节点来自判断,而边沿节点的所有覆盖邻居节点均为近边沿节点,可由边沿节点发出“一跳”消息通知,限于篇幅,文中不予详述。

4 算法性能分析与仿真

4.1 性能分析

基于精细化梯度的传感器网络节点距离测量算法 DV-FGI 与传统 DV-hop 算法相比,借助待测节点的精细化梯度值与位置的关系,可将节点距离测量分辨率提高至节点间距 D_i , 而 DV-hop 算法的测量分辨率为网络节点有效通信半径 R 。在无线传感器网络中,为保证网络路由的高可靠性,节点通信半径 R 一般远远大于节点间距 D_i , 否则网络工作时极有可能存在不连通状态。当节点通信半径大于 $2D_i$ 时,算法 DV-FGI 的测量精度远远高于 DV-hop 算法,至少提高 2 倍以上。

另外,网络参数的变化对两种测量算法的影响不完全相同。影响测量结果的网络参数主要有节点密度 ξ 、通信半径 R 等。节点密度的改变对 DV-hop 算法的结果影响不是很大,只在一定程度上通过影响实际上的有效通信半径(因为网络节点分布的离散性,节点有效通信半径小于节点发射距离)而影响测距结果,但对 DV-FGI 算法的测距结果影响较大,节点密度加大,节点间距 D_i 减小,测量精度将明显提高;因测量分辨率不同,通信半径的改变对 DV-FGI 算法的影响较小,对 DV-hop 算法的影响较大,加大通信半径, DV-hop 的测量精度会明显变差。另外,精细化梯度值为节点覆盖邻居节点的平均最小跳数值,个别节点最小跳数值的改变不会导致节点精细化梯度值的剧变,因此,基于精细化梯度的测量比基于最小跳数值的测量具有较好的鲁棒性。

DV-FGI 算法与 DV-hop 算法相比,一般只少量增加了计算开销或存储开销,仅在待测节点为边沿节点或近边沿节点时才增加少许的通信开销,而节点距离测量精度得到极大提

高。DV-FGI 算法用于最小跳数路由无线传感器网络时,如果以汇聚节点作为基准点和锚节点之一,节点距离测量几乎可以在最小跳数路由梯度场形成过程中“捎带”完成,效率极高。

4.2 仿真分析

仿真对象为节点均匀分布在 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 矩形区域内的平面无线传感器网络,各传感器节点的通信半径大致相当,在网络内至少配置两个锚节点。仿真目的主要是将 DV-FGI 测量算法与 DV-hop 测量算法的结果相比较,并与实际值相对照,以验证 DV-FGI 算法的有效性。主要仿真参数如表 1 所列。

表 1 主要仿真参数

传感区域 (m * m)	节点 总数	sink 节点位置	锚节 点数	锚节点间 距离(m)	通信半径 (m)	待测节点距 sink 节点距离(m)
30 * 30	31 * 31	(0,25)	2	25	5	0~30

图 3(a)显示了处在不同径向位置的节点具有的精细化梯度值的仿真结果,揭示了 MHGF 中节点精细化梯度值的分布特征。由图可见,随节点距基准节点径向距离的增加,节点的精细化梯度值单调增加,但并不成严格的线性关系,尤其在靠近网络边界处,曲线变化规律与网络非边界区域相比变化较大。图 3(b)显示了边界精细化梯度估算值与实测值的拟合情况,明显可见在网络边界处,实测值出现异常情况,这是因为网络覆盖区域外无网络节点。

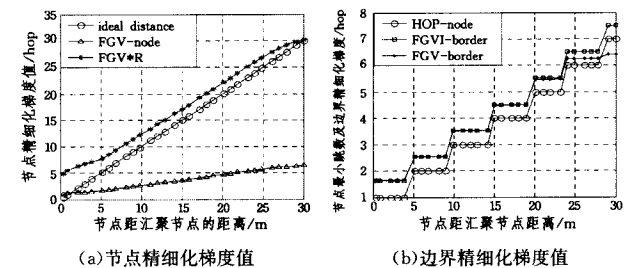


图 3 不同径向位置节点的精细化梯度值

图 4 为不同节点密度下节点间距离测量的仿真结果。由于 DV-hop 算法的测距分辨率为节点的有效通信半径,其测距结果受节点密度的影响较小,测量值的波动主要来自节点密度对有效通信半径的影响;DV-FGI 算法的分辨率为节点间距,其测距精度受节点密度的影响较为明显,随着节点密度的增大,测量结果愈接近实际值。由图可见,不管节点密度是大还是小, DV-FGI 算法的测量精度均高于 DV-hop 算法,且节点密度愈大,精度愈高。

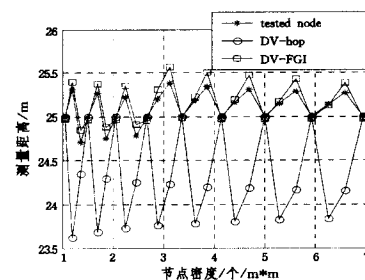


图 4 不同节点密度下的节点间距离测量值

图 5 为不同通信半径下节点间距离测量的仿真结果,随着通信半径的增大, DV-hop 算法的测量分辨率及测量误差均变差,而 DV-FGI 算法对不同的通信半径均有较好的测量分

分辨率和测量精度。

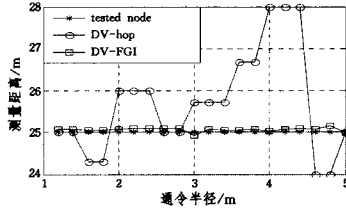


图5 不同通讯半径下的节点间距离测量值

图6为待测节点处于不同位置时节点间距离测量的仿真结果,图7为待测节点处于不同位置时的距离测量误差,其中,“DV-FGI(REV)”曲线为边沿节点或近边沿节点用“代测”节点校正后的曲线。由图6与图7可见,DV-FGI算法的测量结果明显优于DV-hop算法。

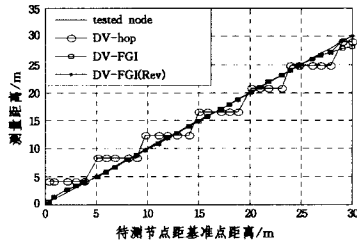


图6 不同待测节点位置时的节点间距离测量值

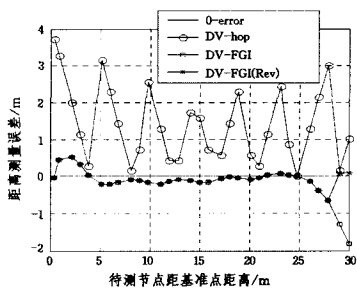


图7 不同待测节点位置时的节点间距离测量误差

结束语 理论分析和仿真结果表明,在最小跳数梯度场中,处于梯度层次中不同径向位置的节点具有的精细化梯度值不同,DV-FGI算法将最小跳数梯度场中节点的精细化梯度值用于传感器网络节点间的距离测量,与DV-hop算法相比,在不增加传感器节点任何物理功能模块的前提下,能将节点距离测量的分辨率从节点通信半径 R 提高到节点间距 D_i ,而且只在待测节点为网络边沿节点或近边沿节点时增加少许通信开销,在节点密集分布的无线传感器网络中,能极大地提高节点间距离测量和节点定位的精度,并提供了节点间相互区别的能力,用此方法得到的节点定位值可具有节点ID的部分功能。该算法具有低成本、低能耗、低通信开销、低处理开销和低时延的优点,在资源严格受限的无线传感器网络中无疑具有一定的应用前景。

本文针对节点近似均匀分布的最小跳数路由无线传感器网络,借助网络节点精细化梯度值的分布特征,将节点精细化

梯度值与距离间的关系简化为分段线性关系,描述了一种基于精细化梯度的节点距离测量算法,分析并验证了该算法的有效性。围绕该算法,在以下两个方面还有待进一步深入研究:

(1)该算法用于节点非均匀分布网络的效果分析以及适用程度。

(2)如何根据网络的实际状况,在将节点精细化梯度值-距离关系的线性化过程中,选择更优的线性化方法,并引入自适应校正因子,以进一步提高算法在各类无线传感器网络中的测量效果。

参考文献

- [1] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system [C]// IEEE Globe COM101. San Antonio, Texas; IEEE Press, 2001, 5: 2926-2931
- [2] Xu Guochang. GPS theory algorithms and applications[M]. Berlin; Springer-Verlag, 2003
- [3] Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing[C]// Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS101). Maui, Hawaii, USA; IEEE Computer Society, 2001, 3: 1312-1320
- [4] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41
- [5] Girod L, Byehovskiy V, Elson J, et al. Locating tiny sensors in time and space; a case study[C]// Werner B, ed. Proc. of the 2002 IEEE Int'l Conf. on Computer Design; VLSI in Computers and Processors. Freiburg; IEEE Computer Society, 2002; 214-219
- [6] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(5): 28-34
- [7] Sun Y J, Sun Y G, Chen B J, et al. Research on the one vertex and two vertices connectivity reliability in the wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2003, 4: 379-385
- [8] Han K H, Ko Y B, Kim J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks[C]// IEEE VTC2004-Fall. Los Angeles; IEEE Press, 2004, 4: 2979-2983
- [9] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the ACM Mobicom'99. Seattle; ACM Press, 1999; 174-185
- [10] Nagpal R, Shrobe H, Bachrach J. Organizing a global coordinate system from local information on an Ad Hoc sensor network[C]// Proceedings of 2nd International workshop on Information Processing in Sensor Networks(IPS'03). Palo Alto; IEEE Press, 2003; 333-348
- [11] Zhu H S, Sun L M, Xu Y J, et al. Mechanism and analysis on fine-grain gradient sinking model in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2007, 18(5): 1138-1151

(上接第43页)

- [18] Martin J-P, Alvisi L, Dahlin M. Minimal Byzantine Storage[A]// Proceedings of the 16th International Conference on Distributed Computing[C]. Toulouse, France; Springer-Verlag, 2002; 311-325
- [19] Awerbuch B, Scheideler C. Towards a Scalable and Robust DHT

- [A]// Proceedings of the Eighteenth Annual ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures[C]. Cambridge, Massachusetts, USA; ACM Press, 2006; 318-327
- [20] Dolev D, Hoch E N, Renesse R V. Self-stabilizing and Byzantine-tolerant Overlay Network[A]// Principles of Distributed Systems[C]. Heidelberg; Springer Berlin, 2007; 343-357