

# 无线传感器网络中不良节点的判断与定位<sup>①</sup>

于 宁<sup>②</sup> 万江文 马万兴\* 冯仁剑

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

(\* 北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

**摘 要** 为降低整个无线传感器网络的定位误差,基于图论相关原理和方法,对无线传感器网络中存在的边缘节点和亚孤立节点进行了判断,通过对此类不良节点周围的节点密度、接收锚节点的范围和方向进行分析,给出了不良节点定位误差偏大的理论解释和对其进行修正定位的解决方案,确立了无线传感器网络中边缘节点和亚孤立节点的判断与定位方法。不同场景下定位性能的仿真实验显示,运用这种方法,对规则的网络拓扑,经修正后不良节点的定位精度比修正前一般可以提高 17% 以上;对不规则的网络拓扑,经修正后的亚孤立节点定位精度比修正前一般可以提高 10% 以上。

**关键词** 无线传感器网络, 定位, 图论, 不良节点

## 0 引 言

无线传感器网络覆盖区域边缘的节点,由于其周围的邻居节点较少,通常定位精度较低、能量消耗较快,会对环境监测和目标跟踪等带来不利影响。目前,对边缘节点的研究主要集中于探测边缘节点的方法上。文献[1]的算法基于局部 Voronoi 多边形,利用节点一跳邻居节点来测试节点是否处于边缘位置。文献[2]和[3]采用右手法则来寻找边缘节点,文献[4]的算法仅利用节点的连通信息,通过建立最短路径树来寻找边缘节点。个别位于网络边缘或者网络中不良位置的节点,甚至可能出现周围邻居节点数过少,而导致成为孤立节点或者亚孤立节点。对于孤立节点的处理,一些研究者利用有移动功能的节点,围绕着孤立节点移动,接收孤立节点的信息,并把接收到的信息传递到整个传感器网络中<sup>[5, 6]</sup>。上述研究工作从不同角度出發,建立了各自探测边缘节点的方法。如果能够建立一个具有共性意义的边缘节点和亚孤立节点判断方法,并对此类节点进行修正,将会降低整个网络的定位误差。为此,本文引入图论中的相关概念和方法,对边缘节点和亚孤立节点进行了判断,给出了不良节点定位误差偏大的理论解释和对其进行修正定位的解决方案。

## 1 边缘节点和亚孤立节点的判别

在无线传感器网络定位的研究中,边缘节点和亚孤立节点对于整个网络的平均定位精度影响较大,为了对这类节点进行判断、分析和定位,我们先引入图论中如下定义:

**定义 1: 图。**图  $G$  由两个集合  $V$  和  $E$  组成,记为:  $G = (V, E)$ 。其中:  $V$  是顶点的有穷非空集合,  $E$  是  $V$  中顶点偶对(称为边)的有穷集合。

可以使用图中的点表示传感器节点,用连线表示一对相邻节点之间的通讯线路。

**定义 2: 偏心距。**设  $v$  为图  $G$  的给定节点,  $v$  的偏心距是指  $v$  与和它相距最远的节点间的距离  $e(v)$ ,用数学公式表示为:  $e(v) = \max_{u \in V(G)} d(u, v)$ ,其中“ $\max_{u \in V(G)}$ ”表示:当节点  $u$  取遍  $G$  节点集当中的所有节点时,计算对应的  $d(u, v)$ ,比较得到其中的最大值。  $d(u, v)$  指节点间的最短距离。

由定义 2,可以得到网络中所有节点的偏心距。

**定义 3: 节点的度。**节点的度是指与  $v$  邻接的节点数,记作  $\deg(v)$ 。

**定义 4: 边界。**图  $G$  的边界是指具有最大偏心距的节点组成的集合,记作  $P(G)$ 。

由以上定义我们给出边缘节点和亚孤立节点的

① 863 计划(2006AA01Z222)资助项目。

② 男,1980 年生,博士,讲师;研究方向:无线传感器网络;联系人, E-mail: nyu@buaa.edu.cn  
(收稿日期:2007-12-07)

判断方法:当节点满足  $P(G)$ ,且节点的度小于网络平均连通度时,我们将其标记为边缘节点。当节点的度小于网络平均连通度一定范围时,将其标记为亚孤立节点。

如图 1(a)所示,200 个节点的网络,分布在  $300 \times 300$  的区域,网络平均连通度为 10.08,节点中最大偏心距为 13,符合定义的边缘节点经过判断后使用小三角形标出。这里需要说明的是,当节点偏心距与最大偏心距相差不大时也看作满足  $P(G)$ ,经此判断得出的边缘节点,可能会包含少许临近网络边缘但不是最靠边缘的节点,但它们因为满足边缘节点的条件,且在定位研究中的特征类似于边缘节点,在此我们也将它们看作边缘节点。另外,亚孤立节点包含孤立节点和那些连接度较小但与周围仍有连接的节点。图 1(b)中使用叉号表示度小于网络平均连通度 30% 的亚孤立节点,可见亚孤立节点与边缘节点有一定的重合。

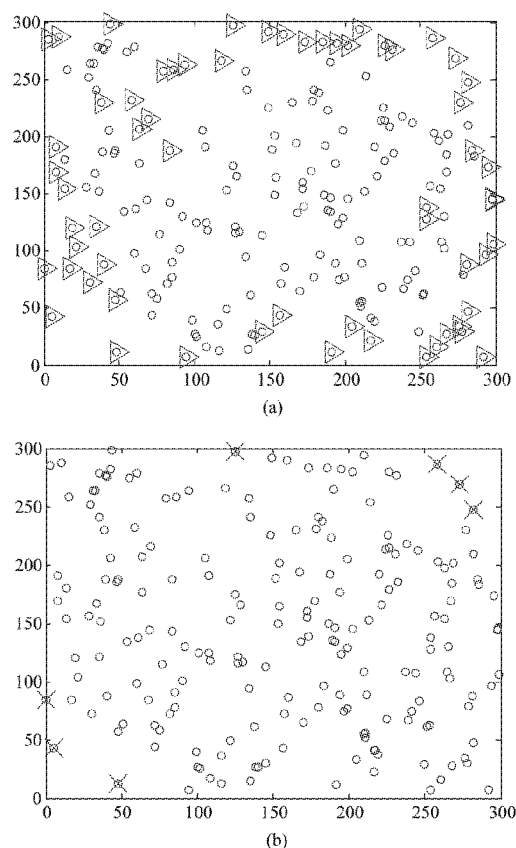


图 1 边缘节点和亚孤立节点示意图

## 2 边缘节点和亚孤立节点的定位误差分析

对边缘节点和亚孤立节点使用 DV-Distance<sup>[7]</sup>算法计算其误差,并与网络节点定位的平均误差作比

较,以分析不良节点的定位性能。图 2 所示为边缘节点和亚孤立节点的平均定位误差,与网络中所有节点的平均定位误差作比较可以看出,网络节点的平均定位误差随锚节点比例的变化浮动于 18% ~ 31%,边缘节点和亚孤立节点的平均定位误差随锚节点比例的变化分别浮动于 24% ~ 48% 和 47% ~ 143%。可见,位于边缘或处于孤立位置的节点,定位误差偏大。其中,当锚节点较少时,亚孤立节点定位精度还要更低。原因主要是这些节点的平均连通度小,能够连接的邻居节点和能够接收到的锚节点的数目相对少。图 3 显示了处于边缘或孤立位置的节点能接收到的锚节点数目。在一跳范围内,边缘节点只有当锚节点比例大于 50% 时,才能收到 3 个以上的锚节点;而亚孤立节点仅依赖于一跳范围内的锚节点不能进行定位,必须依靠两跳范围内锚节点的帮助,增加收到的锚节点信息,才能进行定位。

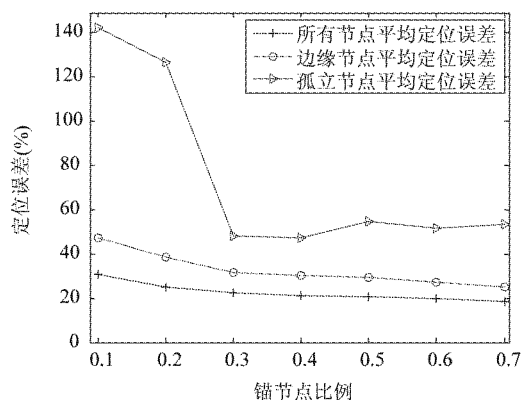
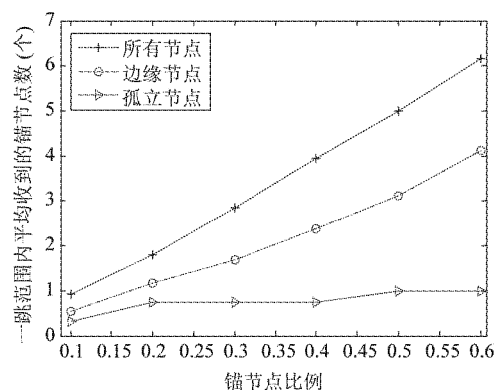
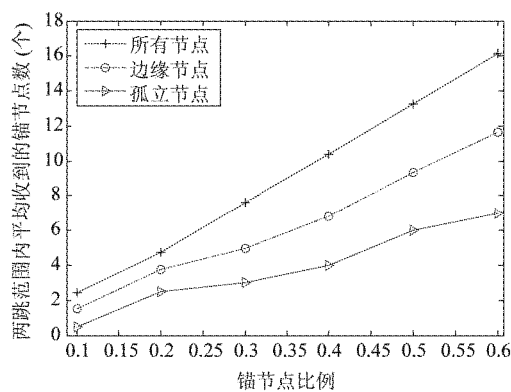


图 2 边缘和亚孤立节点的定位误差

下面分析边缘节点和亚孤立节点定位误差偏大的原因。网络拓扑结构仍沿用 200 个节点的网络,节点分布在  $300 \times 300$  的区域,网络平均连通度为 10.08,节点中最大偏心距为 13,锚节点比例 30%。取边缘节点或亚孤立节点  $V$ ,使用最小路径方法生成它到所有锚节点的路径图,如图 4 所示。其中实心节点代表锚节点,左下角被三角形和叉号标记的节点  $V$  既是边缘节点同时又是亚孤立节点,此节点到各锚节点的最短路径由连线标出。可以看出  $V$  节点因其位置的原因造成以下特点:(1)通信范围内邻居节点少;(2)收到的锚节点信息来自一定的方向范围;(3)需依靠通信范围外相距多跳的锚节点进行定位。



(a)



(b)

图3 边缘和亚孤立节点平均收到的锚节点数目

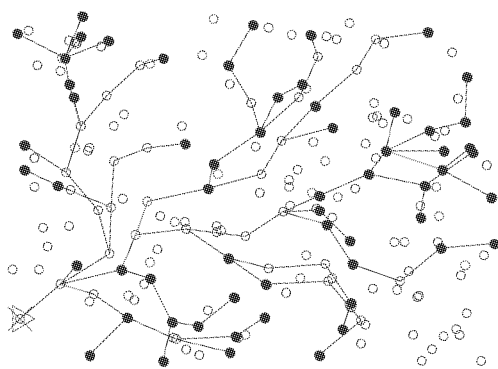


图4 边缘节点到各锚节点的最短路径图

### 3 边缘节点和亚孤立节点定位的解决方案

上面分析了边缘节点和亚孤立节点不同于一般节点的特点,现在分别就每个特点对定位的影响进行分析和解决。

边缘节点和亚孤立节点通信范围内邻居节点少(特点1),即小范围内节点密度低。设两个非邻居节点  $A$  和  $B$ ,它们之间的直线距离为  $2R$ 。当网络节点密度高时,如图 5(a)所示,节点  $A$  到  $B$  之间可能存在一条接近直线的路径,且间隔的各跳段距离都

接近  $R$ ,此时节点  $A$  到  $B$  的最短路径距离约等于其直线距离  $2R$ 。当网络节点密度低时,如图 5(b)和(c)所示,图 5(b)中节点  $A$  到  $B$  的最短路径虽为直线,但路径上间隔的各跳段距离都不接近  $R$ ;图 5(c)中  $AB$  间的最短路径,虽然间隔的各跳段距离都接近  $R$ ,但路径为折线。在这两种情况下,计算出的  $AB$  间的最短路径距离约为  $3R$ ,与其直线距离相比存在一定的误差。而图 5(d)所示的情形将导致更大的误差,此时  $AB$  间的最短路径距离约为  $4R$ 。

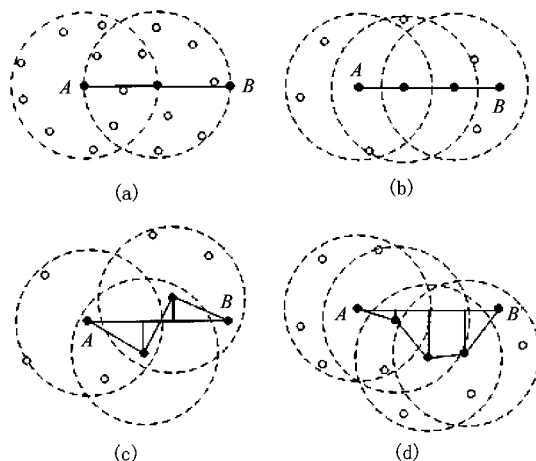


图5 (a) 跳段距离接近  $R$  的直线路径 (b) 跳段距离不接近  $R$  的直线路径 (c) 跳段距离接近  $R$  的折线路径 (d) b与c的混合情况

通过上述分析可以看出,当节点密度低时,节点间的最短路径距离往往存在较大的误差,边缘节点或亚孤立节点所在的小范围内节点密度低,正符合上述所说的情况。对于边缘节点或亚孤立节点的定位,可以采取下列方法进行修正。

设节点  $V$  到锚节点  $A$  的估计距离为  $D(V, A)$ , 取

$$D(V, A) = \mu D(V, A), 0 < \mu \leq 1 \quad (1)$$

通过系数  $\mu$  可以调整边缘节点与锚节点之间估计距离的大小,在一定程度上弥补边缘节点所在的小范围内节点密度低的缺点。系数  $\mu$  的值可以根据节点局部密度的不同而变动。

边缘节点收到的锚节点信息来自一定的方向范围(特点2),这对于边缘节点来说有利有弊。以图 4 中的节点  $V$  为例,若以  $V$  为原点,水平方向建立横轴,则  $V$  收到的锚节点信息均来自于它的第一和第四象限。这在一定程度上影响了  $V$  从多个方向上接收更多锚节点的能力,对于节点  $V$  来说属于不利影响。另一方面,节点在每个方向上收到的锚节点

信息,包含的距离误差都有所不同,方向分的越细,就越能根据不同方向的特点来调整距离误差。边缘节点  $V$  仅从它的右方接收信息,这对于用公式统一修正其距离误差是有利的。

边缘节点和亚孤立节点需依靠多跳以外的锚节点进行定位(特点 3),究竟锚节点控制在几跳范围以内合适,是否需要连接的锚节点越多越好?为了讨论这个问题,仍然沿用前述场景,锚节点比例还是控制在 30%。改变 TTL(time to live)值以控制边缘节点和亚孤立节点接收锚节点的数量,定位误差随 TTL 的变化情况如图 6 所示。可见边缘节点和亚孤立节点的定位精度并不随接收的锚节点数量的增多而提高,实际上,只要能满足节点定位的基本条件,接收到的锚节点与节点自身的距离越近越好。当扩大范围去接收多跳以外过多的锚节点信息时,不但会使定位误差增大,而且会使节点能量消耗增加。因此,要使不良节点达到较高的定位精度,接收的锚节点满足基本定位要求即可,接收范围不应扩大到多跳以外。同时满足这两个条件时,定位精度较高,且消耗能量较少。显然,这不仅适用于边缘节点和亚孤立节点,对于网络中的一般节点也应当是适用的。如图 6 所示,跳数范围为 3 时,边缘节点和亚孤立节点都能接收到满足定位要求的锚节点并进行定位,继续增大跳数范围会引起定位误差和能耗的增大。

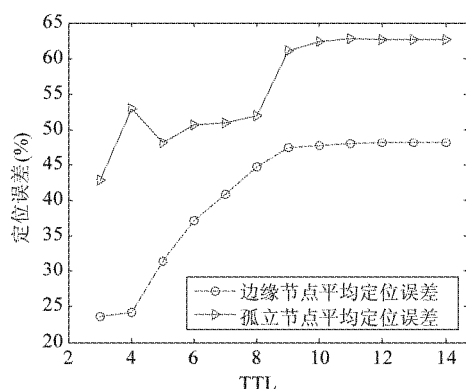


图 6 定位误差随 TTL 的变化情况

#### 4 仿真验证

设置一个节点数目为 200 的网络,节点随机分布在  $300 \times 300$  的区域范围内,传感器节点发射半径为 40,网络平均连通度为 10.08,网络中节点的最大偏心距为 13。对此环境下的网络分别执行:(1)判断边缘节点和亚孤立节点;(2)使用 DV-Distance 定位算法对边缘节点和亚孤立节点进行定位;(3)使用

修正后的方案对边缘节点和亚孤立节点进行定位。对定位误差的评价,采用定位绝对误差除以节点发射半径,然后取百分数的均一化方法。仿真实验结果如图 7 所示,改进后边缘节点的定位精度提高 17% 以上,亚孤立节点的定位精度提高 22% 以上。为了说明本文方法对于不同拓扑结构的适应情况,将网络节点发射半径降低为 36,同样分布在  $300 \times 300$  的网络范围内,且按照环状分布,以暴露出网络中心无节点覆盖的空洞区域,如图 8(a)所示。对此环状拓扑采用本文方法进行边缘节点和亚孤立节点

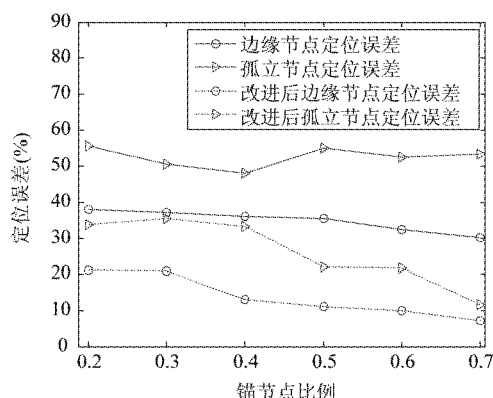


图 7 改进前后的定位误差比较

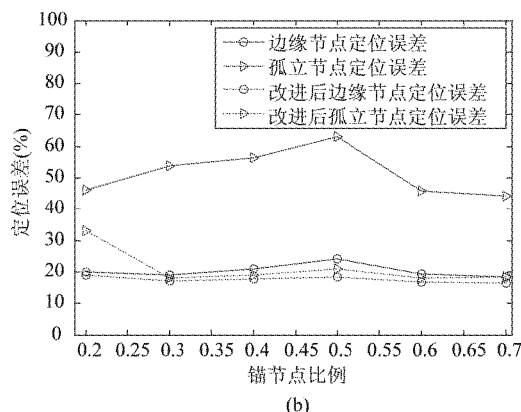
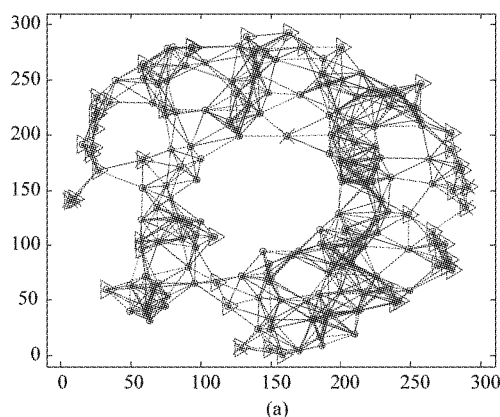


图 8 环状拓扑定位性能分析

判断,图中三角形符号表示边缘节点,叉形符号表示亚孤立节点。对于亚孤立节点和环状外边缘的节点,绝大多数都能够被判断出,判断效果较好;而对于环状内边缘,即空洞附近的节点,仅有部分被判断,探测的敏感度不够,这也是本文方法的不足之处。对于判断出的边缘节点和亚孤立节点,采用本文修正方法进行处理,定位精度都有所提高,其中亚孤立节点定位精度提高比较明显,如图 8(b)所示。

## 5 结 论

无线传感器网络中边缘节点和亚孤立节点存在如下特点:通信范围内邻居节点少,收到的锚节点信息来自一定的方向,需依靠通信范围外相距多跳的锚节点进行定位。引入图论中节点的度和偏心距的概念可以有效地判断这两类节点。边缘节点和亚孤立节点周围节点密度低,节点间的最短路径距离存在较大的误差。采用调整系数修正不良节点与锚节点之间估计距离的大小,可以弥补不良节点所在小范围内节点密度低的缺点。边缘节点和亚孤立节点在定位时,接收的锚节点数目满足基本定位要求即可,扩大跳数范围过多增加锚节点数目会引起定位误差和能耗的增加。对于环状拓扑,本文方法可以判断出绝大多数外边缘的节点和部分内边缘的节点,使用本文修正方法对这些节点进行处理后,定位精度能够明显提高。

## 参考文献

- [1] Zhang C, Zhang Y B, Fang Y G. Detecting coverage boundary nodes in wireless sensor networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Florida, USA, 2006. 868-873
- [2] Ahmed N, Kanhere S S, Jha S. Efficient boundary estimation for practical deployment of mobile sensors in hybrid sensor networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Vancouver, Canada, 2006. 662-667
- [3] Sahoo P K, Hsieh K Y, Sheu J P. Boundary node selection and target detection in wireless sensor network. In: Proceedings of the International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, Singapore, 2007. 1-5
- [4] Wang Y, Gao J, Mitchell J S B. Boundary recognition in sensor networks by topological methods. In: Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking, California, USA, 2006. 122-133
- [5] Ishizuka H, Kamiya M, Sasaki K, et al. Collecting adaptive data for isolated wireless sensors with patrol nodes in live E!. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Data Management, Nara, Japan, 2006. 1630672
- [6] Seah Winston K G, Tan H X, Liu Z, et al. Multiple-UUV approach for enhancing connectivity in underwater ad-hoc sensor networks. In: Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, Washington DC, USA, 2005. 1640102
- [7] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks. *Journal of Telecommunication Systems*, 2003. 267-280

## Judgment and location of misbehavior nodes in wireless sensor networks

Yu Ning, Wan Jiangwen, Ma Wanxing\*, Feng Renjian

(School of Instrument Science & Opto-Electronics Engineering of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

(\* Automation School of Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

### Abstract

In order to reduce the localization error of misbehavior nodes like boundary nodes and isolated nodes in wireless sensor networks, the related principles and methods of graph theory were used to judge these misbehavior nodes. Through the analysis of density around misbehavior nodes, range and direction of received anchors, the reason that location errors of misbehavior nodes were ever greater was theoretically explained. Moreover, the solution schemes were put forward to judge and locate the misbehavior nodes and correct the location error. The localization performance was compared in different scenes. The simulation results show that the localization accuracy of misbehavior nodes with correction under regular network topology can be improved 17% compared with that of without correction. While in irregular network topology, the localization accuracy of isolated nodes can be improved 10% compared with that of without correction.

**Key words:** wireless sensor networks, localization, graph theory, misbehavior nodes