

## 传感器网络中一种基于维诺图的跟踪节点选择算法\*

任倩倩<sup>1,2,3</sup>, 李金宝<sup>1,2,3</sup>, 孙蓓蓓<sup>3</sup>



<sup>1</sup>(黑龙江省数据库与并行计算重点实验室(黑龙江大学), 黑龙江 哈尔滨 150080)

<sup>2</sup>(电子工程黑龙江省高校重点实验室(黑龙江大学), 黑龙江 哈尔滨 150080)

<sup>3</sup>(黑龙江大学 计算机科学技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

通讯作者: 李金宝, E-mail: jbli@hlju.edu.cn

**摘要:** 能源节省和跟踪的及时、准确是移动目标跟踪的重要研究问题,提出了一种基于维诺图的跟踪节点选择算法,利用维诺图的性质建立网络模型,选择距离目标最近的传感器节点参与目标跟踪,同时给出了睡眠节点的唤醒机制,以保证跟踪及时准确的同时最小化唤醒节点数量.最后通过实验讨论了网络中各个参数对算法性能的影响.实验结果表明,该算法在能源节省和跟踪精度方面具有很好的效果.

**关键词:** 目标跟踪;节点选择;维诺图;调度

中文引用格式: 任倩倩,李金宝,孙蓓蓓.传感器网络中一种基于维诺图的跟踪节点选择算法.软件学报,2017,28(Suppl.(1)): 30-38. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17004.htm>

英文引用格式: Ren QQ, Li JB, Sun BB. Tracking nodes selection algorithm based on Voronoi structure in sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017,28(Suppl.(1)):30-38 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17004.htm>

### Tracking Nodes Selection Algorithm Based on Voronoi Structure in Sensor Networks

REN Qian-Qian<sup>1,2,3</sup>, LI Jin-Bao<sup>1,2,3</sup>, SUN Bei-Bei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Key Laboratory of Database and Parallel Computing of Heilongjiang Province (Heilongjiang University), Harbin 150080, China)

<sup>2</sup>(Key Laboratory of Electronic Engineering Colleges of Heilongjiang Province (Heilongjiang University), Harbin 150080, China)

<sup>3</sup>(School of Computer Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Energy saving and the tracking performance are two important issues in moving target tracking. This paper presents a Voronoi structure-based nodes selection algorithm, which constructs a network model based on the property of Voronoi, and selects sensor nodes which are more close to the target to participate in tracking. This paper also presents a nodes scheduling mechanism, which minimizes the number of awaking nodes with tracking quality guarantee. Finally, a set of simulation experiments are made to analyze the effects of various parameters on the network performance. Experimental results show the excellent performance of the proposed algorithm in terms of energy saving and tracking quality.

**Key words:** target tracking; node selection; Voronoi; schedule

移动目标跟踪是无线传感器网络的一个重要研究问题.目标跟踪在智能导航、室内定位、战场目标追踪、野生动物跟踪等方面具有重要应用<sup>[1,2]</sup>.为了节省能量,许多目标跟踪方法采用部分节点工作,其他节点睡眠的机制来调度节点.然而如何选择工作节点,以保证目标出现在网络内任何位置都能够被及时、准确地监测到并定位,是一个重要的研究问题.

现有基于传感器网络的目标跟踪大多采用测量目标发出信号强度的方法检测目标.目标所发出物理信号强度在传播过程中会随着空间距离的增加而衰减,因此通过测量信号强度数值即可计算移动目标与接收到该

\* 基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F2017022)

Foundation item: Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (F2017022)

收稿时间: 2017-05-15; 采用时间: 2017-09-23

目标所发出信号的传感器节点之间距离。然而,环境中存在的噪音会干扰信号的衰减,使得测量的信号强度数值存在误差。通常情况下,距离跟踪目标越近的传感器节点所提供信号强度数值越可靠,这启发我们尽量选择距离移动目标较近的传感器节点参与对目标的定位。然而,如何及时、准确地找到距离移动目标最近的节点,是一个重要的研究问题。

本文研究基于维诺图的跟踪节点选择算法。该算法将网络划分为多个维诺网格,选择目标所在网格内节点参与目标跟踪。维诺图的性质保证目标所在维诺网格内的节点是距离目标较近的节点。为了节省网络能量,可以使目标所在网格内的节点工作而其他节点睡眠。然而随着目标的移动,目标可能进入其他网格,这就需要根据目标的运动规律预测目标即将到达的网格,并将该网格内的节点唤醒。本文根据目标到相邻网格交叠边的距离是否大于给定阈值来判断是否唤醒相应网格内的传感器节点。

本文的贡献总结如下:

(1) 提出了基于维诺图的网络模型。该模型将整个网络被划分成多个维诺网格,并且保证无论目标处于任何网络的任意位置,网格内所有节点与目标的距离小于网格外任意节点与目标的距离;

(2) 给出了基于维诺图的网络构建算法。该算法首先在网络中均匀地选取若干个头节点,然后根据头节点的位置构建维诺网格。为了保证每个网格内节点的数量不少于给定阈值,进一步提出了节点调整策略。

(3) 提出了基于维诺图的跟踪节点选择算法。该算法利用维诺图的性质,判定目标所在维诺网格,并将网格内的节点提前唤醒。

(4) 搭建了一个模拟实验平台,进行了大量模拟实验,讨论了算法中各个参数对算法性能的影响。

本文第1节介绍与移动目标信息收集和节点选择的相关研究工作。第2节介绍本文所提出算法的网络模型。第3节描述构建网络的具体方法。第4节提出跟踪节点选择算法。第5节是实验部分,介绍实验的设置以及实验结果,最后是文章结论。

## 1 相关工作

近年来,无线传感器网络移动目标跟踪和信息收集得到了广泛研究,并提出了一些有效的方法。文献[3]考虑了网络的动态特性,提出了一种基于伯努利的近似抽样聚合算法,满足高精度数据收集的要求,此外,还提出两种自适应算法来解决样本精度不同和感知数据类型不同的问题。文献[4]提出了针对多个应用程序连续采样并收集数据的方法,为了解决其非线性优化问题,提出了一种事件复杂度较低的算法。

选择部分节点跟踪目标可以有效降低网络能耗。现有的节点选择算法大多基于睡眠调度机制,即使多数节点处于睡眠状态,一小部分节点被激活工作<sup>[5]</sup>。文献[6]利用网格的结构提出了能源有效的节点协作算法。该算法理论上为节点之间如何调度给出了明确的计算和分析方法。文献[7]中,Mantri 等人提出了传感器网络中有效的节点调度算法。该算法利用节点的移动性,采用数据聚合技术来调度节点。文献[8]提出的调度算法由 Sherly 等人提出,包括能源管理和唤醒调度机制。唤醒调度机制中,每个传感器节点根据未发送出去的数据包给自己设定一个唤醒时间间隔。能量管理机制中,根据节点的能量来调度节点,有效地减少了能量的消耗。文献[9]提出一种新的基于加权距离的节点选择方法。该方法根据预测目标状态的概率分布函数和传感器的属性及感知到的数据,选择激活最小加权的传感器节点执行跟踪任务。文献[10]提出基于协作信号处理机制,唤醒处于监测区域4个顶角位置的节点以监测潜在目标。活跃节点采集对目标的感知数据并发送给管理节点进行目标定位,同时管理节点预测目标  $M$  时间后的位置。上述研究方法充分考虑了传感器网络能源有限的特性,在保证能源节省的情况下,提高了跟踪质量。

部分研究工作考虑了传感器网络中感知数据的不确定性。文献[11]研究异步传感器网络的目标跟踪问题,提出了基于数据融合的目标跟踪方法,充分考虑了采样和通信中的不确定性。文献[12]提出了基于不可靠节点序列的目标跟踪方法。该方法考虑环境噪音和感知范围的不规则性等因素,将跟踪问题转化节点序列的最优匹配问题。文献[13]提出了可容错的目标跟踪方法。该方法用高斯混合模型描述目标信号数据的分布情况。本文研究了目标发出信号在传播过程中的衰减特性,通过选择距离目标最近的节点参与跟踪来降低数据误差对目标

定位准确度的影响.

## 2 网络模型

为了简化描述,我们假设传感器网络布置在一个二维平面上,网络由 $M$ 个传感器节点组成,传感器节点集合表示为  $N=\{n_1, n_2, \dots, n_M\}$ . 这些节点均匀分布在监测区域内,每个节点可以通过 GPS 或其他定位机制获取其在预定义  $x$ - $y$  坐标系下的位置坐标. 假设所有节点的通信范围和感知范围相同,定义为以  $R$  为半径的圆形.

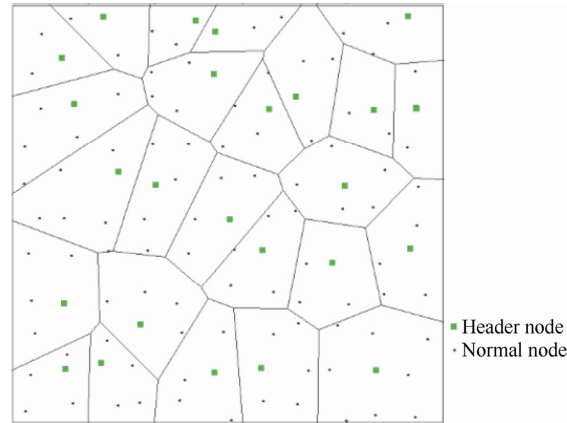


Fig.1 Voronoi based network model

图 1 基于维诺图的网络模型

本文采用基于维诺图的网络模型,整个网络被看作一个维诺图,即网络被划分成若干个不规则维诺网格,也即维诺网格.每个维诺网格内有 1 个头节点和多个普通节点,如图 1 所示.第 3 节将给出头节点选择算法.同一维诺网格内节点可以直接通信,头节点负责收集所在维诺网格内普通节点采集的感知数据,并在感知数据上执行定位算法,计算目标位置.当目标进入某一维诺网格内时,处于维诺网格内的头节点和普通节点共同感知目标,普通节点产生的数据信息传输给头节点,头节点收集数据后对目标定位,普通节点和头节点协同完成跟踪工作.

## 3 基于维诺图的网络模型构建算法

本节将描述基于维诺图的网络模型构建算法.该算法由两部分组成,即确定头节点和调整维诺网格内普通节点.第 3.1 节和第 3.2 节将分别描述每个子算法.

### 3.1 确定网络内头节点

本节给出维诺网格中头节点选择算法,为使选出的头节点均匀地分布在网络中,算法将给出头节点选择规则.在该规则下,算法第 1 次选择头节点时每个节点当选的概率相等.接下来,算法根据头节点的位置构建维诺图,保证每个维诺网格中有且仅有 1 个头节点.最后调节每个维诺网格中普通节点个数,使每个维诺网格中至少普通节点个数不少于阈值  $T$ .  $T$  值可以根据具体的目标定位算法设置.本文实验中设置  $T$  值为 2.

初始阶段,网络内每个传感器节点  $n_i$  产生一个 0,1 之间的随机数  $s_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ ).  $n_i$  根据以前是否当选过头节点及当选头节点的概率  $p$  信息生成一个阈值  $ts_i$ .  $ts_i$  的计算公式如下:

$$ts_i = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times \left( r \bmod \frac{1}{p} \right)}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $p$  为节点  $n_i$  成为头节点的概率,  $r$  为当前选择头节点的轮数. 在网络初始化时  $r=1$ ,  $G$  为在最近的  $1/p$  轮中未当选过头节点的节点集合<sup>[14]</sup>. 如果  $s_i < ts_i$ , 则  $n_i$  升级成为头节点, 否则为普通节点.

确定头节点后, 根据头节点的位置在网络中建立维诺图. 本文采用逐点插入算法建立维诺图. 维诺图的每一个单元中有且仅有 1 个头节点, 用  $H=\{h_1, h_2, \dots, h_{|H|}\}$  表示头节点集合, 第  $j$  个维诺网格内普通节点集合表示为  $PN_j=\{pn_{j1}, pn_{j2}, \dots, pn_{j|PN_j|}\}$ , 该维诺网格的顶点坐标集合表示为  $V_j=\{v_{j1}, v_{j2}, \dots\}$ . 当目标进入维诺网格  $j$  内时, 维诺图性质保证维诺网格  $j$  内的所有节点与目标的距离小于其他维诺网格内任意节点到目标的距离. 也即, 维诺网格  $j$  内节点为距离目标最近的  $|PN_j|$  个节点.

### 3.2 调整网格内普通节点

头节点选取的任意性使得每个维诺网格的尺寸不同, 即维诺网格内普通节点的个数也不相同. 为了保证目标定位的准确性, 实际应用中往往对每个网格内普通节点个数具有一定的要求. 为了保证每个维诺网格中普通节点个数不小于给定阈值  $T$ , 本节研究网格内普通节点的调整算法. 算法的基本思想是使普通节点数目较多的网格内节点移动到普通节点数目较小的网格内. 算法分两个步骤: 确定所属维诺网格和普通节点调整.

#### 1. 确定所属维诺网格

初始阶段, 任意维诺网格内头节点  $h_k$  广播所属请求消息  $HREQ$ , 以确定所在维诺网格内普通节点.  $HREQ$  消息为一个二组  $\langle h_k, V_k \rangle$ , 其定义如下:

$h_k$ : 头节点  $id$ ;

$V_k$ :  $h_k$  所在维诺网格内的顶点集合.

普通节点  $n_i$  收到  $HREQ$  消息后, 根据自己的位置判断是否在  $V_k$  所构建的维诺网格内, 若在其内部, 则向发送该  $HREQ$  消息的头节点返回所属应答信息  $HREP$ , 并记录  $h_k$ . 若不在  $V_k$  所构建的维诺网格内, 则忽略  $HREQ$  消息.  $HREP$  消息包含节点  $n_i$  的  $id$  及其位置信息. 经过上述两次信息交换, 每个节点都可以确定所在维诺网格.

#### 2. 普通节点调整

头节点  $h_k$  收集所属信息后, 统计其维诺网格内普通节点个数  $c_k$ , 并向邻居头节点广播. 如  $c_k < T$ , 则  $h_k$  向邻居头节点发成员请求消息  $MREQ$ , 请求新的普通节点加入.  $MREQ$  消息为一个元组  $\langle qc, (x_k, y_k) \rangle$ , 其定义如下:

$qc$ : 请求普通节点个数;

$(x_k, y_k)$ :  $h_k$  的位置信息.

普通节点调整算法如下:

第 1 步: 将收到的邻居网格内普通节点个数按降序排序, 得到有序列表  $c_j (j=1, 2, \dots)$ .

第 2 步: 依次向  $c_j$  对应的  $h_j (j=1, 2, \dots)$  发送  $NREQ$  请求消息, 请求移动  $c_j - T$  个普通节点, 记为  $qc$ .

第 3 步: 如果  $c_k \geq T$ , 则停止发送请求. 否则,  $j++$ , 执行第 2 步.

接收到  $MREQ$  消息的头节点通知其普通节点移动到  $h_k$  所在维诺网格.

## 4 基于维诺图的跟踪节点选择算法

本节研究参与跟踪节点的选择问题, 并给出节点调度和跟踪算法. 在目标移动过程中, 通过预测目标位置, 我们可以确定目标在下一时间间隔所在的维诺网格, 并将该维诺网格中睡眠节点激活参与目标跟踪. 本节引入了一个参数  $\delta$ , 用来度量节点到维诺网格边界的距离是否足够小, 并作为是否激活目标所在维诺网格中的节点的判定依据.  $\delta$  值的设定将在第 4.2 节讨论. 本文第 4.1 节介绍目标的发现过程, 第 4.2 节给出网络内节点调度算法, 第 4.3 节阐述目标信息到头节点的传输算法.

### 4.1 目标发现

考虑到目标自任意位置进入网络都会经过网络的边缘这一情况, 算法设定当目标未进入网络内时, 只使处于网络边缘网格中的头节点工作, 其他节点处于休眠状态. 当目标进入网络时, 工作中的节点会唤醒目标周围的睡眠节点完成收集信息和目标定位工作.

当目标进入到网络监测区域时,首先会经过网络的边缘.图2是网络边缘的部分截图,其中五角星代表目标,菱形节点为与目标处于同一维诺网格的节点,这些节点将参与定位,正方形代表头节点,黑色圆点代表普通节点.当目标进入到位于网络边缘的维诺网格中,该维诺网格中的头节点能够感应到目标,并立即唤醒所在维诺网格内的普通节点,被唤醒的普通节点与头节点共同执行目标跟踪工作.普通节点采用测量信号强度方法确定与目标之间的距离,并将距离信息发送给头节点,头节点接收到数据后计算目标位置.

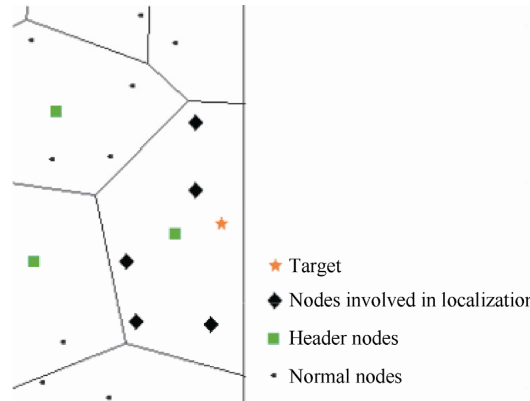


Fig.2 Figure of discovering target

图2 目标发现示意图

#### 4.2 节点调度算法

随着目标的移动,系统在跟踪目标的同时需要估算目标下一时刻所处的维诺网格.当目标即将进入新的维诺网格时,系统需要提前唤醒该维诺网格内睡眠的节点.下面将给出待唤醒节点选择规则.

任意时刻  $t$ , 目标处于单元  $i$  内, 头节点  $h_i$  估算目标位置为  $L_t$ . 如图3所示, 网格  $i$  的邻居维诺网格分别为  $i_1, i_2, i_3$  和  $i_4$ .  $i_1, i_2, i_3$  和  $i_4$  与  $i$  相邻的边分别表示为  $i \wedge i_1, i \wedge i_2, i \wedge i_3$  和  $i \wedge i_4$ .

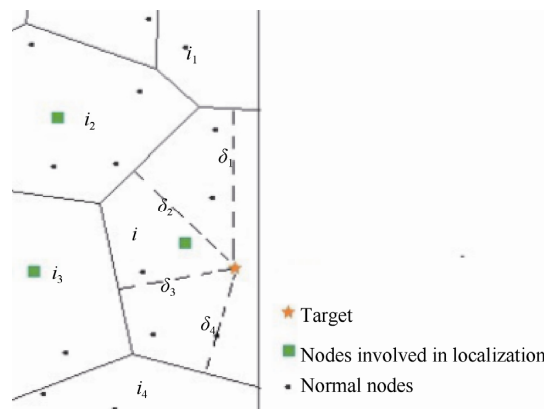


Fig.3 Figure of nodes scheduling

图3 节点调度示意图

头节点  $h_i$  分别计算  $i \wedge i_1, i \wedge i_2, i \wedge i_3$  和  $i \wedge i_4$  与  $L_t$  的距离  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ , 并判断与给定阈值  $\delta$  的大小关系, 下面将分两种情况加以讨论.

情况 1: 给定  $\delta (j=1, 2, 3, 4)$ , 如果  $\delta_j < \delta$ , 则  $h_i$  广播唤醒消息, 唤醒维诺网格  $j$  内节点准备采集目标的感知数据.

$\delta$  值的大小与节点的采样频率  $f$  和目标的 最大速度  $v_{\max}$  有关, 其公式如下:

$$\delta = \frac{1}{f} \cdot \frac{v_{\max}}{2} \quad (2)$$

从公式中可以看出,  $\delta$  为目标在  $1/f$  时间内移动最大距离的一半.  $\delta$  值的设置保证无论目标从  $i \wedge i_1, i \wedge i_2, i \wedge i_3$  和  $i \wedge i_4$  中哪条边离开维诺网格  $i$ , 都一定会被监测到. 同时保证目标即将进入的维诺网格内节点可以提前被唤醒准备参与目标跟踪工作.

情况 2: 给定  $\delta_j$  和  $\delta_k (j, k=1, 2, 3, 4 \wedge j \neq k)$ , 如果  $\delta_j < \delta \wedge \delta_k < \delta$ , 则  $h_i$  广播唤醒消息, 同时唤醒网格  $j$  和  $k$  内节点准备采集目标的感知数据, 如图 4 所示.

当目标进入新的维诺网格时, 被唤醒的节点采集对目标的感知数据, 同时头节点向目标刚离开维诺网格内头节点发送睡眠消息. 收到睡眠消息的头节点通知其维诺网格内普通节点进入休眠状态. 如果头节点所在维诺网格不是边缘维诺网格, 则自己也进入休眠状态, 以进一步节省能耗.

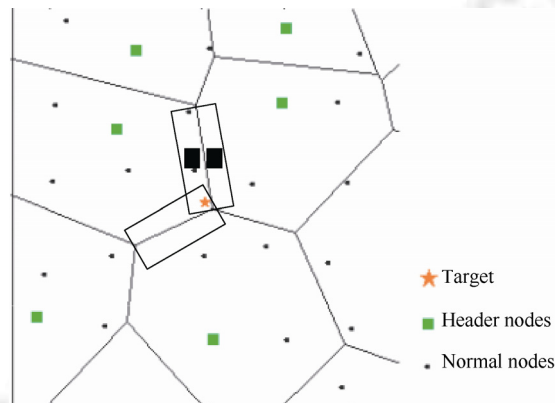


Fig.4 The second case of nodes scheduling

图 4 节点调度情况 2 示意图

### 4.3 目标信息汇聚

被唤醒的节点等待目标的到来, 当目标进入刚被唤醒的节点所在的网格中时, 头节点和普通节点协同感知目标, 采集感知数据. 普通节点周期性地采集的感知数据和采集时间发送给头节点. 头节点收集普通节点的感知数据, 并在数据上执行定位算法. 现有定位算法都可以应用到本文的跟踪过程. 本文实验采用经典的三边定位方法. 参与定位节点与目标的距离估算越准确, 定位误差就越小. 本文采用选择距离目标最近节点参与定位, 可以将基于信号强度测距的三边定位方法误差降到最低.

## 5 实验结果

本节通过模拟实验来分析各参数对网络性能的影响. 由于无线传感器网络中, 通信带来的能量消耗是网络的主要能耗, 实验在比较不同参数对网络的影响时, 用节点通信次数来度量网络能量消耗. 在实验中, 我们改变网络中传感器节点的数量、头节点的数量以及  $\delta$  值的大小来评估各个参数对网络能量消耗的影响. 当评估一个参数时, 其他参数值保持不变. 本文第 5.1 节说明模拟实验的基本配置以及网络设置, 第 5.2 节~第 5.4 节分别讨论网络内节点数量、头节点的数量以及  $\delta$  值对网络能耗的影响.

### 5.1 实验设置

实验中, 我们使用 HP X230 计算机、Windows 7 操作系统以及 Java 语言在 eclipse 工具中搭建了无线传感器网络的模拟环境, 利用图形界面呈现了实验效果. 网络的构建采用逐个节点插入法来生成维诺图. 网络中节点均匀地分布在  $600 \times 580$  单位的范围内. 传感器节点的数量在 100~150 之间变化, 默认值是 122. 头节点的数量具有随机性, 其数目主要由节点成为头节点的百分数  $p$  的大小来控制, 实验中,  $p$  值在 0.10~0.40 的范围内变化, 默认



值是 0.25。 $\delta$ 值在 10~40 之间变化,默认值是 30。在评估某一参数对实验结果的影响时,其他参数值均取默认值。由于实验中各个参数的变化会影响网络中维诺网络的划分,而维诺网络的划分结果具有一定的随机性。为了避免这种随机性对实验结果的影响,我们每次实验执行 4 次,最终实验结果为 4 次实验结果的均值。

## 5.2 $p$ 值对算法性能的影响

由前面的分析可知, $p$  值的大小直接影响选择头节点的阈值  $ts_i$ ,控制网络中头节点个数所占比例,从而影响网络性能。本节主要讨论传感器节点的数量在 100~150 之间变化,其他参数恒定的情况下, $p$  值变化对实验结果的影响。实验中, $p$  值分别为 0.1,0.15,0.2,0.25。

图 5 是传感器节点数量分别在 100,121,144 变化时, $p$  值对应的参与定位的平均节点数量变化的影响。从图中可以看出,随着  $p$  值的增加,参与定位的节点平均数变小,这是由于  $p$  值增加提高了头节点在总节点数中的比率,对于每条折线来说,总节点数量不变,头节点的数量就相应增加,这样就导致了传感器网络中维诺网格的数量变多,相应地每个维诺网格中的节点数量减少,参与定位的传感器节点也就变少。当参与定位的节点数量减少到一定程度时,这种变化会趋于稳定。这是因为实验中设定每个维诺网格中的普通节点数量不少于 2 个,当网格中普通节点少于 2 个时,会从其他网格中调整普通节点,这样,每次定位时普通节点加上头节点数量基本保持在 3 个~4 个。如果  $p$  值继续增大,则无法保证参与定位的节点数量,会导致定位不准确,因此在实际应用中可以根据具体的定位算法所需要的节点数量来设定合适的  $p$  值。

图 6 展示了  $p$  值变化对网络通信次数的影响。从图 6 中可知,在传感器节点数不变的情况下,随着  $p$  值的增加,通信次数呈现降低的趋势。这是由于在传感器节点数量不变的情况下, $p$  值增加,头节点数量也随之增加,相应的网络中维诺网格的数量就会增多。同时,每个维诺网格中节点数量随之减少,即参与定位的节点数量降低,这样就导致了每次定位的通信次数减少,并且在激活新的维诺网格时,通信次数也减少。

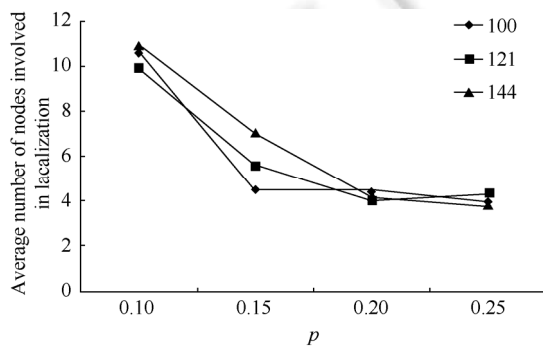


Fig.5 Influence of  $p$  on number of nodes involved in localization

图 5  $p$  值对参与定位节点数目的影响

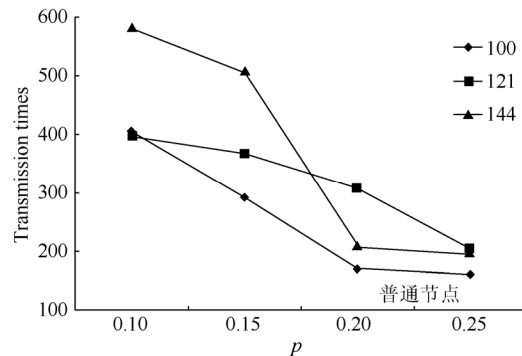


Fig.6 Influence of  $p$  on transmission times

图 6  $p$  值对通信次数的影响

从以上分析可知,参与定位的节点数量和网络通信次数都会随着  $p$  值的增加而减少。传感器节点之间通信次数的减少会导致网络内能量消耗的降低,从而延长了网络的生命周期。 $p$  值的增加虽然有利于延长网络生存期,但是同时参与定位的节点数量降低,这样会降低定位的精度。而且, $p$  值过大也会导致网络中头节点过多,从而使维诺网格过多,造成每个网格中没有足够的普通节点,影响网络的正常构建,同时影响定位准确度。因此在实际应用中,我们要根据使用的定位算法、网络的规模以及移动目标的运动特性来确定  $p$  值的大小。

## 5.3 $\delta$ 值对算法性能的影响

在模拟实验中, $\delta$  值的变化会直接影响唤醒节点数目,从而影响通信次数和定位效果。本节将讨论  $\delta$  值的变化对实验结果的影响。在实验过程中, $\delta$  值在 10~40 之间变化,当  $p$  值为 0.25 时,分别统计网络中传感器节点数量在

100~150 之间,网络的通信次数和处于唤醒状态的节点数量均值。

图 7 展示了  $\delta$  值变化对网络通信次数的影响。由于网络中主要的能耗都来自于通信,所以该图也间接地说明了  $\delta$  值与能量消耗的关系。从图中我们可以看出,随着  $\delta$  值的增加,通信次数增加。这是由于当目标到所在维诺网格的任意一条边距离小于  $\delta$  时,与所在维诺网格共用该边的维诺网格中的节点将被唤醒,如果目标同时到两条边的距离都小于  $\delta$ ,则这两条边对应的两个维诺网格内的节点都将被唤醒。这导致部分不需要参与跟踪的节点被唤醒。因此, $\delta$  值越大,唤醒的节点就越多,通信次数也就越多。

由于  $\delta$  值是衡量目标到维诺网格某条边距离的阈值,它不仅会影响通信次数,也会影响唤醒节点的数量。图 8 是  $\delta$  值变化与当前处于唤醒状态的节点数量之间的关系。从图中我们可以看到,蓝、红、绿 3 条折线分别表示网络中传感器节点总数量分别处于 100,122,144 时,随着  $\delta$  值的不断增加,唤醒状态的节点数量变化的情况。显然,图中显示处于唤醒状态的节点数量与  $\delta$  值正相关,即随着  $\delta$  值的增加而增加。 $\delta$  值增加表示目标到维诺网格边的距离阈值变大,而只要距离小于该阈值,对应边连接的其他维诺网格中的传感器节点就会被唤醒,所以, $\delta$  值越大,睡眠节点被唤醒的可能性就越大,处于唤醒状态的节点也就越多。

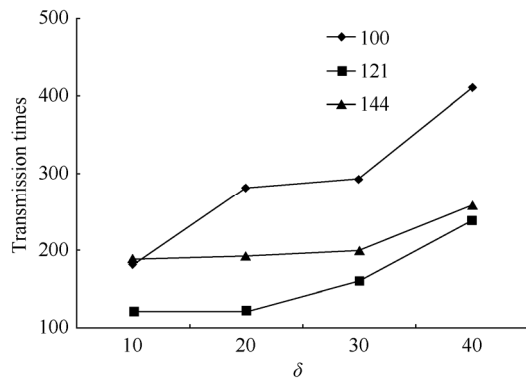


Fig.7 Influence of  $\delta$  on transmission times

图 7  $\delta$  值对通信次数的影响

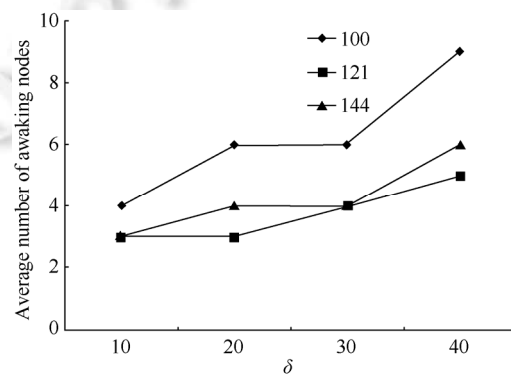


Fig.8 Influence of  $\delta$  on number of awakening nodes

图 8  $\delta$  值对被唤醒节点数目的影响

虽然  $\delta$  值的增加导致通信次数增加,处于唤醒状态的节点数目就会增加,消耗的能量也就变多,但并不是  $\delta$  值越小对网络越好。 $\delta$  值过小可能导致目标即将进入网格内的节点不能提前被唤醒,因此  $\delta$  值一定要大于目标的最大速度与节点感知时间间隔乘积的一半,以此来保证目标跨越维诺网格的时候一定会被传感器节点感应到,从而唤醒所需的节点。

## 6 结 论

本文研究无线传感器网络中基于维诺图的跟踪节点选择问题。首先构建了基于维诺图的网络模型。该模型根据给定规则选择网络中部分节点为头节点。根据头节点的位置在整个网络内建立维诺图,并利用维诺图的性质,选择距离目标较近的节点参与目标跟踪来提高跟踪准确性。其次,研究节点的调整策略,以保证每个维诺网格中普通节点的数量不少于给定阈值,为目标定位提供必要的感知数据。再次,针对维诺图结构,设计了一种节点调度算法以提前唤醒目标即将到达维诺网格内节点参与工作。该算法在保证目标被及时发现的同时最小化被唤醒节点数量。最后,通过模拟实验分析了网络中各个参数对网络性能的影响。在实际应用中,可以根据网络的规模、节点工作频率以及被监测目标的移动特性等信息来设置参数,从而达到网络能耗和跟踪质量的最佳平衡。

## References:

- [1] Souza M, Wark T, Karunanithi M, Ros M. Evaluation of realtime people tracking for indoor environments using ubiquitous motion



- sensors and limited wireless network infrastructure. *Pervasive & Mobile Computing*, 2013,9(4):498–515.
- [2] Ren QQ, Li JZ. Information quality-aware tracking in uncertain sensor network. *IJSNET*, 2013,14(1):33–40.
- [3] Cheng SY, Li JZ, Ren QQ, Yu L. Bernoulli sampling based  $(\epsilon, \delta)$ -approximate aggregation in large-scale sensor networks. In: Proc. of the INFOCOM Congress. 2010. 1181–1189.
- [4] Fang XL, Gao H, Li JZ, Li YS. Application-Aware data collection in wireless sensor networks. In: Proc. of the INFOCOM Congress. 2013. 1645–1653.
- [5] Zhang B, Tong ED, Hao J, Niu WJ, Li G. Energy efficient sleep schedule with service coverage guarantee in wireless sensor networks. *Journal of Network & Systems Management*, 2016,24(2016):834–858.
- [6] Feng J, Lian BW, Zhao HW. Adaptive energy optimization for object tracking in wireless sensor network. *KSII Trans. on Internet and Information Systems*, 2015,9(4):1359–1375.
- [7] Mantri DS, Pawar PM, Prasad NR, Prasad R. An efficient schedule based data aggregation using node mobility for wireless sensor network. In: Proc. of the VITAE Congress. 2014. 1–5.
- [8] Sherly PAL, Murugan K. An energy efficient wakeup schedule and power management algorithm for wireless sensor networks. In: Proc. of the ICRTIT Congress. 2012. 314–319.
- [9] Zhao W, Han Y, Wu H, Zhang L. Weighted distance based sensor selection for target tracking in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009,16(8):647–650.
- [10] Li D, Wong KD, Hu YH, Sayeed A. Detection, classification and tracking of targets in distributed sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002,19(2):17–29.
- [11] Yang XS, Zhang WA, Chen ZQ, Yu L. Hybrid sequential fusion estimation for asynchronous sensor network-based target tracking. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2017,25(2):669–676.
- [12] Zhong ZG, Zhu T, Wang D, He T. Tracking with unreliable node sequences. In: Proc. of the INFOCOM Congress. 2009. 1215–1223.
- [13] Ding M, Cheng XZ. Fault tolerant target tracking in sensor networks. In: Proc. of the MOBIHOC. 2009. 125–134.
- [14] Handy MJ, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. In: Proc. of the MWCN. 2002. 368–372.



任倩倩(1980—),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为传感器网络,数据库.



孙蓓蓓(1991—),女,硕士,主要研究领域为传感器网络,目标跟踪.



李金宝(1969—),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为传感器网络,移动社会网,大数据.