

# 传感器网络中一种基于两阶段睡眠调度的目标跟踪协议

任倩倩 李建中 高 宏 程思瑶

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

**摘 要** 移动目标跟踪是传感器网络的一个重要应用. 网络中传感器节点协作发现目标并将对目标的感知信息反馈给用户. 为了有效地减少网络能耗和提高跟踪质量, 文中提出一种基于两阶段睡眠调度的目标跟踪协议. 该协议将整个跟踪过程划分成两个阶段, 根据各阶段对节点密度要求的不同, 分别采用不同的睡眠调度机制. 文中进一步对所提出协议进行优化, 在保证跟踪质量的同时最小化系统能耗. 最后用 36 个传感器节点验证了所提出协议的有效性.

**关键词** 无线传感器网络; 目标跟踪; 睡眠调度; 网络覆盖; 网络划分

**中图法分类号** TP311 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.01971

## A Two-Phase Sleep Scheduling Based Protocol for Target Tracking in Sensor Networks

REN Qian-Qian LI Jian-Zhong GAO Hong CHENG Si-Yao

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Mobile target tracking is an important application in wireless sensor networks, in which all sensor nodes collaborate to discover the target and report its location information to users. To conserve energy in networks and improve tracking performance, the authors propose a two-phase sleep scheduling based tracking protocol. It divided the whole tracking procedure into two phases and schedule nodes differently at each phase. The authors further optimized the node scheduling protocol to minimize the energy consumption with guarantee of tracking quality, and evaluate the method in an indoor environment with 36 sensor nodes. The experimental results show that the protocol performs better in terms of tracking quality and energy consumption.

**Keywords** wireless sensor networks; target tracking; sleep scheduling; nodes coverage; network division

### 1 引 言

移动目标跟踪是传感器网络的重要研究问题,

在环境监测、灾难预报和抢险救灾等诸多领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 目标跟踪协议通常将对跟踪目标的响应时间和跟踪准确性等作为衡量跟踪质量的指标. 然而在传感器网络中, 大量的传感器节点采用

收稿日期: 2009-07-15; 最终修改稿收到日期: 2009-08-25. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB303005)、国家自然科学基金(60533110, 60773063)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0333)和黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11531276)资助. 任倩倩, 女, 1980 年生, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络. E-mail: qqren@hit.edu.cn. 李建中, 男, 1950 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为数据库、无线传感器网络. 高宏, 女, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为数据库. 程思瑶, 女, 1982 年生, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络.

电池供电,而且通常布置在危险或不可达区域内,这导致为节点更换电池或充电非常困难.因此减少节点能耗也是衡量目标跟踪系统的一个关键因素.

在目标跟踪应用中,传感器节点协作发现跟踪目标并对其进行定位.整个跟踪过程可以分为两个阶段:第1阶段发现目标的出现,第2阶段收集对目标的感知数据、定位.以上两个阶段都不需要网络中的所有节点同时工作,即只有位于移动目标周围的节点参与即可.

基于以上发现,最小化参与通信或信息处理的节点数目,使不工作的节点处于空闲状态可以有效降低系统能耗<sup>[2-3]</sup>.然而空闲节点仍然消耗能量,而且其能耗不可忽视<sup>[2-5]</sup>.据统计节点处于空闲状态准备工作时所消耗的能量约占节点总能耗的99%<sup>[2]</sup>.为了进一步减少能耗,将节点睡眠调度机制引入对象跟踪应用中<sup>[4-7]</sup>.通过减少网络覆盖冗余性,关闭不必要节点或使节点轮流工作达到节省能源目的.上述协议通常需要较高的节点密度或以牺牲跟踪质量作为代价.本文提出一种基于两阶段睡眠调度的目标跟踪协议(Two-phase Sleep Scheduling based Tracking Protocol, TSSTP),该协议根据两个跟踪阶段对节点密度要求的不同,分别分配不同的睡眠调度机制,在保证跟踪质量的同时最大限度地使节点睡眠. TSSTP 可根据需求动态调整睡眠节点数量,因此不需要过高的节点布置密度.

在跟踪的第1个阶段,选择部分节点周期性处于工作和睡眠状态,同时使其它节点睡眠.这些周期性工作的节点发现目标后唤醒部分睡眠的节点.跟踪的第2个阶段中,处于跟踪目标附近的节点被唤醒,开始收集对跟踪目标的感知数据.

显然,尽量减少周期性工作节点的数目可以节省更多的能量,然而可能延长对目标的响应时间,降低跟踪质量.因此节省能耗和保证跟踪质量是相互矛盾的需求.本文深入探讨对 TSSTP 的优化问题,在保证跟踪质量的同时最大限度地减少节点能耗.并将优化问题转化为网络覆盖问题,该问题已证明是 NP 问题.本文给出一个近似算法,在特定条件下该算法的近似比为 2.

另外,相关研究发现跟踪目标并非完全随机移动,其当前的运动轨迹依赖于前一时刻的运动情况.如果可以利用这种依赖性预测目标的出现区域,就可以提前唤醒该区域内的睡眠节点.现有预测节点轨迹方法大多依赖于目标轨迹模型<sup>[8-10]</sup>,本文不建立目标轨迹模型,将预测目标轨迹问题转换为预测

节点状态问题,并利用马尔可夫链理论研究节点状态转换规律,从而推算出跟踪目标即将到达区域内的节点.

本文贡献总结如下:首先设计了基于两阶段睡眠调度的目标跟踪协议 TSSTP,是迄今为止第一个分阶段调整节点调度机制的协议.第二,对 TSSTP 进行进一步优化,并将优化目标转换为网络节点覆盖和节点状态转换问题.优化算法在保证跟踪质量的同时,最大限度地减少系统能量消耗.最后建立 36 个传感器节点组成的小型传感器网络,验证了所提出协议.实验结果表明 TSSTP 在减少系统能耗的同时可以提供更好的跟踪质量.

本文第2节阐述提出的基于两阶段睡眠调度跟踪协议的基本框架及节点状态转换过程;第3和第4节探讨所提出协议的优化问题;第5节评估跟踪协议的性能效果,并在实际研制的网络节点上验证所提出协议的有效性;第6节介绍相关工作;第7节总结全文.

## 2 基于两阶段睡眠调度的目标跟踪协议

### 2.1 协议结构框架

本节介绍 TSSTP 的基本结构框架.为方便起见,给出如下假设:

- (1) 检测区域由大量同类节点组成.所有节点可以利用 GPS 或其他定位技术计算出自身位置.
- (2) 节点的感知区域为以  $R$  为半径的圆形区域,节点  $i$  的感知区域表示为  $C_i (i=1, 2, 3, \dots)$ .
- (3) 节点的通信距离等于节点的感知距离.

假设整个监测区域被划分成均匀的网格,每个网格为  $a \times b$  的矩形区域,如图 1 所示.为网格分配 ID,所有节点可以识别其所在网格的 ID.根据节点任务的不同,将整个网络内的节点划分为 3 类:发现节点、影响节点和普通节点.发现节点周期地处于工

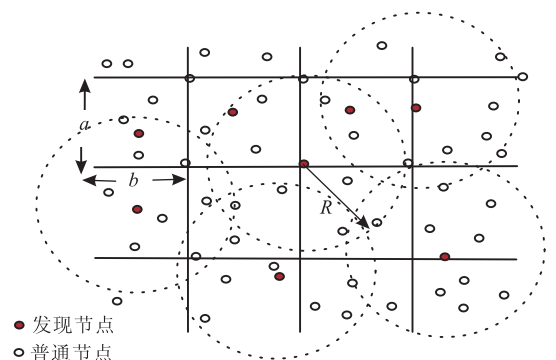


图 1 网络模型

作和睡眠状态,负责发现目标并向普通节点发送唤醒消息.普通节点大部分时间处于睡眠状态,周期地醒过来检测是否接收到唤醒消息.影响节点是特殊的普通节点,负责收集跟踪目标的感知数据.

在发现节点每个执行周期中,假设其处于工作状态的时间为  $T_{\text{wake}}$ ,处于睡眠状态的时间为  $T_{\text{sleep}}$ ,比值  $\gamma = T_{\text{wake}} / (T_{\text{wake}} + T_{\text{sleep}})$  定义为占空比.普通节点的检测周期,即周期地检测唤醒消息的时间间隔为  $T_{\text{detect}}$ .

TSSTP 在两个跟踪阶段采用不同的调度机制.初始时刻所有节点为普通节点.第 1 阶段,每个网格内选择一个普通节点作为发现节点.为平衡节点的

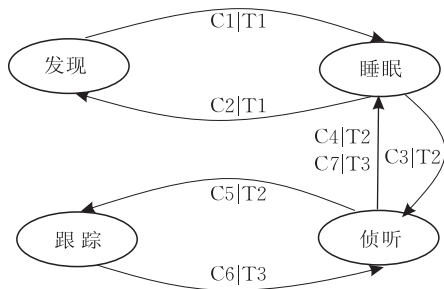


图 2 TSSTP 状态转换示意图

发现节点按照占空比  $\gamma$  在发现和睡眠状态间轮转.当进入发现状态,发现节点检测跟踪目标是否进入其感知区域.如果检测到跟踪目标,发现节点向其网格内的普通节点发送唤醒消息;如果发现跟踪目标已经移出其感知区域,发现节点向普通节点发送睡眠消息.唤醒消息和睡眠消息由消息类型和节点所在网格  $ID$  等信息组成.

普通节点大多数时间保持睡眠状态,并以  $T_{\text{detect}}$  为周期进入侦听状态.处于侦听状态的节点检测是否有发送给它的唤醒消息.如果未检测到唤醒消息,普通节点将继续保持睡眠状态.否则,普通节点变成影响节点,同时转入跟踪状态.

影响节点收集跟踪目标的感知数据,并发送给发现节点以作进一步处理.当对象移出其感知区域,影响节点完成感知工作,转入侦听状态等待来自发现节点的消息.影响节点接收到睡眠消息后,恢复原来的睡眠调度同时变成普通节点.

### 3 发现节点选择

根据所提出睡眠调度机制的特性,发现节点比普通节点消耗更多的能量.在保证网络被完全覆盖的前提下,选择尽量少的发现节点可以节约更多的能耗.本文将发现节点的选择问题转化为网络覆盖

能量消耗,同一网格内的节点轮流成为发现节点.发现节点检测到跟踪对象后,向其周围普通节点发送唤醒消息.接收到唤醒消息的普通节点变成影响节点,并转入第 2 阶段调度.第 2 阶段,影响节点收集跟踪目标的感知数据.当接收到睡眠消息,影响节点恢复成普通节点,返回到第 1 阶段调度.

### 2.2 节点状态转换

TSSTP 为节点分配 4 个状态:发现、睡眠、侦听和跟踪.发现节点周期地处于发现和睡眠状态.普通节点大部分时间处于睡眠状态,周期地转入侦听状态检测唤醒消息.影响节点一直处于跟踪状态.状态转换示意图如图 2 所示.

转换条件:

- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| C1: 经过 $T_{\text{wake}}$ 时间   | C2: 经过 $T_{\text{sleep}}$ 时间 |
| C3: 经过 $T_{\text{detect}}$ 时间 | C4: 未接收到唤醒消息                 |
| C5: 接收到唤醒消息                   | C6: 完成跟踪                     |
| C7: 接收到睡眠消息                   |                              |

节点类型:

- T1: 发现节点 T2: 普通节点 T3: 影响节点

问题.该问题已经证明是 NP 完全问题,这里将给出一个近似算法.

很多研究工作采用条划分算法解决平面覆盖问题<sup>[11-12]</sup>,该方法将整个网络划分成多个矩形条,布置少量特殊节点使矩形条内的所有节点连通.本节提出的选择发现节点算法也将网络划分成矩形条,与上述算法不同,我们采用贪心启发式在每个矩形条内选择最少的发现节点覆盖矩形条区域.选择发现节点过程由 3 个阶段组成:(1) 将整个网络划分成等宽度的矩形条;(2) 在每个矩形条内选择发现节点.(3) 合并每个矩形条内的发现节点,得到整个网络中的发现节点集合.

### 3.1 网络划分

在该阶段,整个网络被划分成宽度为  $\lambda R$  的矩形条,如图 3 所示. $\lambda$  定义为划分因子,它不但决定

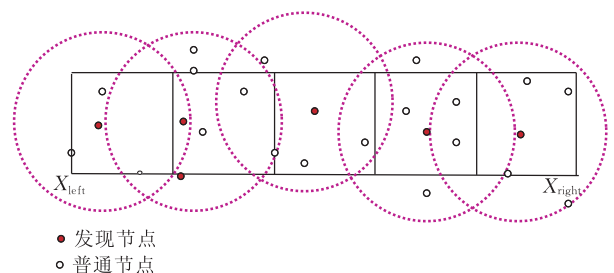


图 3 矩形条划分的一个实例

矩形条的划分结果,甚至会影响整个网络的覆盖情况.第5节将通过大量实验研究 $\lambda$ 对系统性能的影响.

### 3.2 发现节点选择

该阶段要解决的问题是:给定一个矩形条及矩形条内分布的节点集合,找到能够覆盖该矩形条的最小节点子集,即发现节点集合.

为解决上述问题,可以将矩形条划分为多个网格.划分目标是使每个网格至少被一个发现节点覆盖,同时网格的个数最少.对于给定宽度的矩形条,要满足该目标只要保证每个网格的长度最长即可.算法1描述了选择发现节点的过程.

算法1中,数组 $S[1 \cdots n]$ 按照节点 $x$ 坐标递增的顺序记录矩形条 $P$ 内所分布节点. $S[i].x$ 表示节点 $S[i]$ 的 $x$ 坐标,数组 $I[1 \cdots n]$ 记录 $C_{S[1]} \cdots C_{S[n]}$ 的右半部分与矩形条 $P$ 的交点.如果二者存在两个交点,只记录 $x$ 坐标值较小的一个. $I[i].x$ 表示交点 $I[i]$ 的 $x$ 坐标, $x_{\text{left}}$ 是矩形条 $P$ 的左边界 $x$ 坐标, $x_{\text{right}}$ 是其右边界 $x$ 坐标,如图3所示.

算法1从 $P$ 的最左边开始,选择一个可以覆盖长度最长网格的节点 $i$ .选中的节点将作为该网格的发现节点,网格的左右 $x$ 坐标分别为 $x_{\text{left}}$ 和 $I[i].x$ .然后,该网格从 $P$ 脱离,修改 $x_{\text{left}}$ 的值为 $I[i].x$ ,按上述过程递归处理 $P$ 的余下部分,直到整个 $P$ 都被发现节点覆盖.算法1描述如下.

#### 算法1. 选择发现节点.

输入:(1)节点集合 $S[1 \cdots n]$ ;(2)交点集合 $I[1 \cdots n]$ ;  
(3)矩形条左右坐标 $x_{\text{left}}$ 和 $x_{\text{right}}$

输出:发现节点集合

1. while( $x_{\text{left}} < x_{\text{right}}$ )
2. 对于每个节点 $S[i]$
3. if ( $I[i].x - x_{\text{left}}$ )值最大 &&  $S[i]$ 可以覆盖左右 $x$ 坐标分别为 $x_{\text{left}}$ 和 $I[i].x$ 的网格
4. 将 $S[i]$ 加入发现节点集合
5.  $x_{\text{left}} = I[i].x$
6. end if
7. end while
8. 输出一组发现节点

上述算法中,按照节点 $x$ 坐标排序需要时间 $O(n \log n)$ ,计算 $I[1 \cdots n]$ 需要时间 $O(n^2)$ ,因此整个算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ .

### 3.3 合并发现节点

对网络内所有矩形条应用算法1,求出覆盖每个矩形条的发现节点.所有发现节点的集合即整个网络内的发现节点,为所求.

### 3.4 近似比分析

用 $A$ 代表算法1, $OPT$ 代表相应问题的优化解.近似参数为覆盖一个矩形条所需发现节点个数,分别用 $|A|$ 和 $|OPT|$ 表示.用 $\{g_1, g_2, \dots, g_{|OPT|}\}$ 和 $\{a_1, a_2, \dots, a_{|A|}\}$ 分别表示 $OPT$ 和 $A$ 划分矩形条 $P$ 的结果,其中, $g_i$ 和 $a_i$ 分别表示两个算法划分得到的第 $i$ 个网格.

**定理1.** 当 $1 \leq \lambda < \sqrt{2}$ 时, $A$ 的近似比为4.

证明. 该定理采用对 $P$ 内发现节点个数 $m$ 的归纳证明方法.

当 $m=1$ 时, $OPT$ 可以用一个发现节点(例如节点 $A$ )覆盖网格 $g_1$ ,如图4所示,圆盘表示节点的感知区域.对于 $A$ 的最坏情况,选中发现节点位于网格的顶点,此时4个节点(例如节点 $B, C, D$ 和 $E$ )可以覆盖网格 $g_1$ .

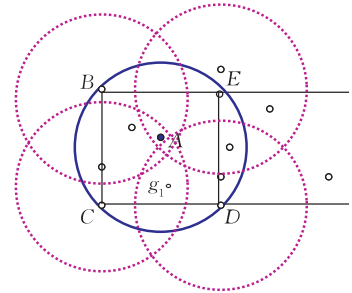


图4 定理1的一个实例

假设 $A$ 使用 $m$ 个发现节点覆盖由 $\{g_1, g_2, \dots, g_{|OPT|-1}\}$ 组成的区域,则 $m$ 不大于 $4(|OPT|-1)$ .对于网格 $g_{|OPT|}$ , $A$ 使用不多于4个节点可以覆盖.因此, $A$ 最多使用 $m+4$ 个发现节点覆盖整个矩形条,即

$$m+4 \leq 4(|OPT|-1) + 4 = 4|OPT|. \text{ 证毕.}$$

**定理2.** 当 $\sqrt{2}/2 \leq \lambda < 1$ 时, $A$ 的近似比为2.

证明. 该定理仍然采用对 $P$ 内发现节点个数 $m$ 的归纳证明方法.

当 $m=1$ 时, $OPT$ 可以用一个发现节点(例如节点 $A$ )覆盖网格 $g_1$ ,如图5所示,圆盘表示节点的感知区域.对于 $A$ 的最坏情况,选中发现节点位于网格的顶点,此时2个节点(例如节点 $B$ 和 $C$ )可以

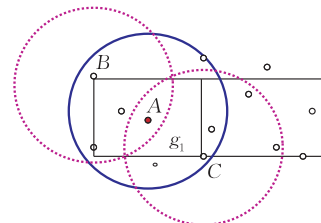


图5 定理2的一个实例

覆盖网格  $g_1$ .

假设  $A$  使用  $m$  个发现节点覆盖由  $\{g_1, g_2, \dots, g_{|OPT|-1}\}$  组成的区域, 则  $m$  不大于  $2(|OPT|-1)$ . 对于网格  $g_{|OPT|}$ ,  $A$  使用不多于 2 个节点可以覆盖. 因此,  $A$  最多使用  $m+2$  个发现节点覆盖整个矩形条, 即

$$m+2 \leq 2(|OPT|-1) + 2 = 2|OPT|. \quad \text{证毕.}$$

当  $\lambda > \sqrt{2}$  时, 无法找到一个发现节点能够覆盖单个网格, 即不满足本文所提出的启发式规则; 而当  $\lambda < \sqrt{2}/2$  时, 整个网络划分得到的矩形条数目过多, 得到的划分结果显然不是最优, 因此本文仅研究  $\sqrt{2}/2 \leq \lambda \leq \sqrt{2}$  的情况.

## 4 影响节点预测

由 2.2 节定义可知任意普通节点某时刻一定处于影响节点状态或非影响节点状态, 如果可以预测下一时刻负责跟踪的节点(即影响节点), 并将它们提前唤醒, 则可以有效提高目标跟踪质量. 本节将研究普通节点的状态转换问题, 并利用马尔可夫链理论解决该问题.

用  $X_n (n=1, 2, \dots)$  表示跟踪节点在第  $n$  时刻的状态,  $i, j$  表示跟踪节点的两个状态(影响节点或非影响节点). 假设当节点处于状态  $i$  时, 存在概率  $p_{ij}$  使其下一时刻处于状态  $j$ , 则

$$P\{X_{n+1}=j | X_n=i, X_{n-1}, \dots, X_1\} = P_{ij} \quad (1)$$

由于节点在  $n+1$  时刻的状态  $X_{n+1}$  只依赖于  $n$  时刻状态而与之之前状态无关. 因此式(1)可以表示为

$$P\{X_{n+1}=j | X_n=i\} = P_{ij} \quad (2)$$

我们假定如果节点  $t$  时刻为影响节点, 那么  $t+1$  时刻仍然保持为影响节点的概率为  $\alpha$ ; 而如果节点  $t$  时刻为非影响节点, 那么  $t+1$  时刻为影响节点的概率为  $\beta$ . 如果假定普通节点为影响节点时状态为 0, 为非影响节点时状态为 1, 那么普通节点的状态变化过程是一个两状态的马尔可夫链, 具有转移概率矩阵

$$P = \begin{bmatrix} \alpha & 1-\alpha \\ \beta & 1-\beta \end{bmatrix}.$$

假定跟踪目标  $t$  时刻位置坐标为  $(x_t, y_t)$ , 其  $t$  至  $t+1$  时刻的轨迹一定在以  $(x_t, y_t)$  为中心, 移动速度值为半径的圆周内, 用  $D_{t+1}$  表示该圆周. 如果某一普通节点  $t+1$  时刻为影响节点, 则其感知区域必然与  $D_{t+1}$  有交叠. 因此  $\alpha$  和  $\beta$  可以表示为

$$\alpha = \frac{\omega_1 S_i}{\pi R^2}, \quad \beta = \frac{\omega_2 S_i}{\pi R^2},$$

其中,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  为权值. 它们的值取决于目标的移动速度和方向以及传感器节点的感知范围等因素, 可以设定为经验值.

图 6 为  $t$  至  $t+1$  时刻网络内节点状态的一个实例. 曲线  $L_t$  为跟踪目标的轨迹, 实线圆周为  $D_{t+1}$ , 虚线圆周表示节点的感知区域. 节点  $N_1, N_2$  和  $N_3$  与  $D_{t+1}$  存在交叠, 因此存在一定概率成为  $t+1$  时刻影响节点. 而且节点  $N_2$  和  $N_3$  覆盖了跟踪目标  $t$  时刻的位置, 因此是  $t$  时刻的影响节点.

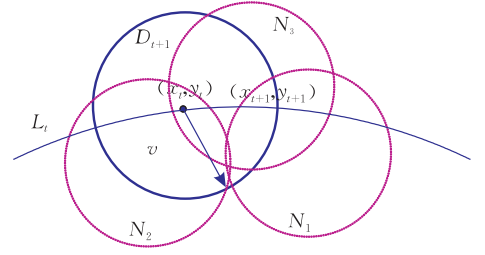


图 6  $t$  至  $t+1$  时刻网络内节点状态

### 算法 2. 确定影响节点.

输入: (1)  $t$  时刻转移矩阵  $P$ ;

(2)  $\pi_{\text{threshold}}$ ;

(3) 目标移动速度;

(4) 目标  $t$  时刻位置坐标  $(x_t, y_t)$

输出:  $t+1$  时刻影响节点集合  $I$

1. 跟踪目标  $t+1$  时刻活动区域  $D_{t+1}$  为以  $(x_t, y_t)$  为圆心, 以  $v$  值为半径的圆形区域
2. 对集合  $I = \{i | C_i \cap D_{t+1} \neq \emptyset\}$  中的节点  $i$
3. 计算  $\pi_0$
4. if  $\pi_0 < \pi_{\text{threshold}}$
5. 从集合  $I$  中去除  $i$
6. end if
7. 输出集合  $I$

根据文献[13], 节点处于状态 0 和状态 1 的极限概率  $\pi_0$  和  $\pi_1$  可分别表示为

$$\pi_0 = \frac{\beta}{1+\beta-\alpha}, \quad \pi_1 = \frac{(1-\alpha)}{1+\beta-\alpha} \quad (3)$$

$\pi_0$  表示节点处于状态 0 即为影响节点的极限概率. 利用式(3), 计算满足  $\pi_0 \geq \pi_{\text{threshold}}$  的所有节点, 这些节点即为下一时刻的影响节点.  $\pi_{\text{threshold}}$  由用户根据具体跟踪要求设定. 算法 2 给出确定影响节点的完整过程. 其中语句 2~3 的时间复杂性为  $O(N^2)$ , 因此整个算法的时间复杂性为  $O(N^2)$ .

## 5 实验结果及分析

本节通过实验对文中所提算法进行分析. 首先研究各系统参数对跟踪质量及系统能耗的影响, 然

后将本文所提出方法与其他跟踪方法进行比较. 所考察的系统参数包括划分因子、占空比及检测周期. 为对跟踪质量进行评估, 定义如下 3 个性能参数.

**定义 1(发现概率).** 跟踪目标进入某区域内, 至少被一个发现节点检测到的概率.

**定义 2(发现延迟).** 跟踪目标出现在监测区域内某一点的时间与其被任意发现节点检测到的时间间隔.

**定义 3(跟踪延迟).** 跟踪目标出现在监测区域内某一点的时间与基站接收到其所在位置信息的时间间隔.

### 5.1 原型系统实现

本文利用 36 个传感器节点在实验室内建立一个小型传感器网络, 并在其上实现了所提出方法. 系统运行在 TinyOS 系统上, 节点程序代码用 NesC 语言编写, 界面程序代码用 VC++6.0 编写. 每个节点配备 MSP430 处理器和 nRF905 无线通信模块. 通过调整无线部件的工作功率和频率, 使所有传感器的通信范围相同. 实验中用电子遥控汽车作为跟踪目标, 为目标配备一个无线部件, 可以连续地发送无线信号. 传感器节点能够监测到跟踪目标所发出信号. 对于每组系统参数, 分别测量目标在任意随机位置的 10 组数据.

### 5.2 平均发现延迟

本节研究平均发现延迟, 即为多次测量发现延迟的平均值. 图 7 显示了不同划分因子和占空比下平均发现延迟的变化情况. 当划分因子为 1.00 时, 发现延迟最低; 而当划分因子为 1.25 时, 发现延迟最高. 因为划分因子不但决定网络内矩形条的个数及每个矩形条内网格的个数, 也影响了发现节点的覆盖度. 在本实验中, 划分因子设置为 1.00 时, 整个网络被划分的网格数目最多, 导致网络由更多的发现节点覆盖, 这样移动目标有更多的机会被发现.

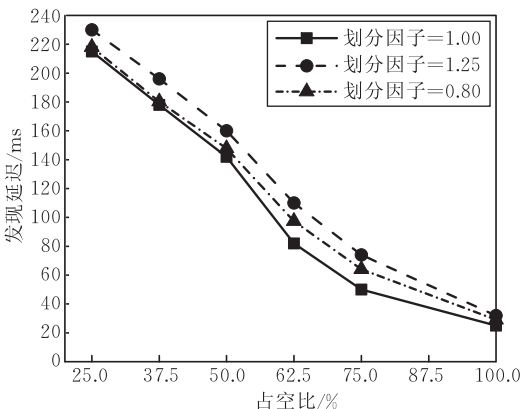


图 7 划分因子、占空比对平均发现延迟的影响

从图 7 也可以看出, 占空比对发现延迟具有明显的影响. 占空比越大, 发现延迟越小. 因为随着占空比的增加, 发现节点的睡眠时间变少, 所以有更多的时间处于工作状态.

### 5.3 平均跟踪延迟

平均跟踪延迟为多次测量跟踪延迟的平均值. 图 8 显示了划分因子和占空比对平均跟踪延迟的影响. 从图中可以看出占空比是影响跟踪延迟的一个重要因素, 随着占空比的增加, 平均跟踪延迟明显降低. 图 9 显示了不同占空比下, 监测周期对平均跟踪延迟的影响. 显然, 平均跟踪延迟与普通节点的监测周期成正相关.

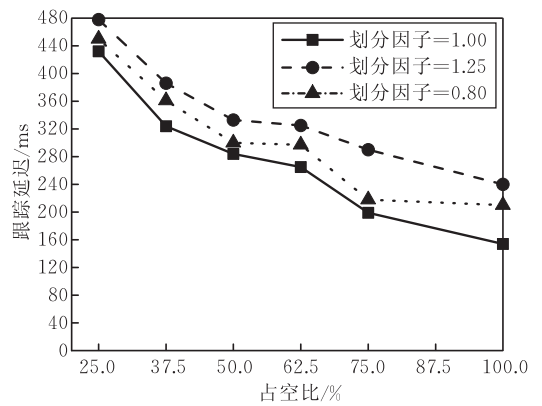


图 8 划分因子、占空比对平均跟踪延迟的影响

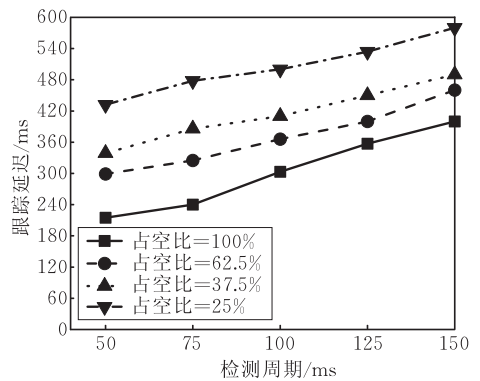


图 9 普通节点检测周期对平均跟踪延迟的影响

### 5.4 平均发现概率

图 10 显示了划分因子和占空比对目标发现概率的影响. 发现概率与占空比成正相关. 当占空比为 1.00 时, 发现概率最大, 而占空比为 1.25 时发现概率最小. 出现这一结果的原因与发现延迟情况相同. 从图中也可以看出, 通过适当地调整参数, 发现概率几乎达到 100%, 而且不低于 85%. 说明本文提出的睡眠调度机制未对系统性能带来过多影响.

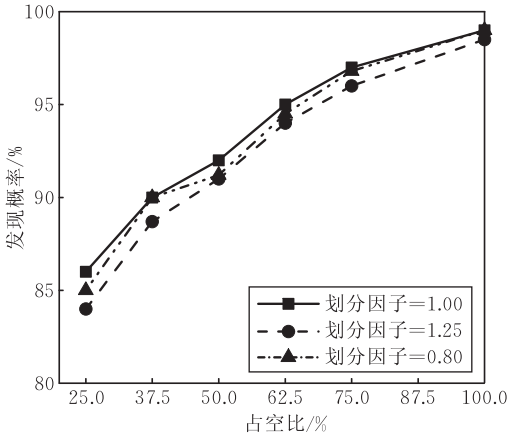


图 10 划分因子、占空比对发现概率的影响

### 5.5 能量节省比率

能量节省比率定义为应用睡眠调度算法所节省的能量与无睡眠调度机制的跟踪算法所消耗能量的比值. 这里考虑的能量消耗为网络中所有节点消耗能量总和, 主要包括以下几部分能耗: 节点状态(睡眠/工作)转换、感知移动目标并采样感知数据、计算跟踪目标位置、无线通信以及保持工作/睡眠状态. 本文按照文献[4]给定的参数计算节点能耗总和. 表 1 给出节点处于不同状态的能耗参数.

表 1 节点处于不同状态的能耗

节点状态	能量消耗
睡眠	$42\mu\text{W}$
侦听	$49.449\text{mW}$
发现	$71.45\text{mW}$
跟踪	$70.01\text{mW}$

图 11 和图 12 显示不同划分因子、占空比下系统能量消耗的情况. 随着占空比的增加, 网络能量消耗明显增加. 因为占空比的增加不但导致发现节点工作时间变长, 而且增加了对对象的检测命中率, 使参与跟踪及通信的发现节点个数增加. 划分因子对系

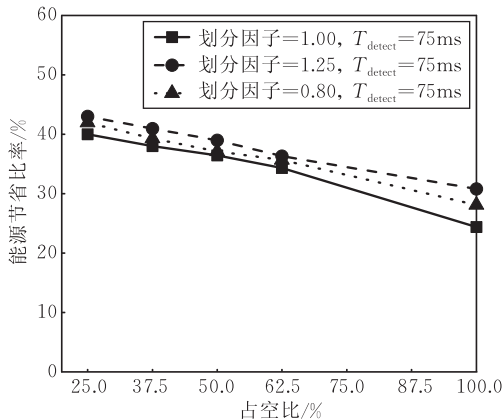


图 11 划分因子、占空比对能源节省比率的影响

统能耗也具有明显影响. 当占空比大于 50% 时, 划分因子为 1.25 时可以节省更多的能量. 当占空比小于 50%, 其区别表现不明显.

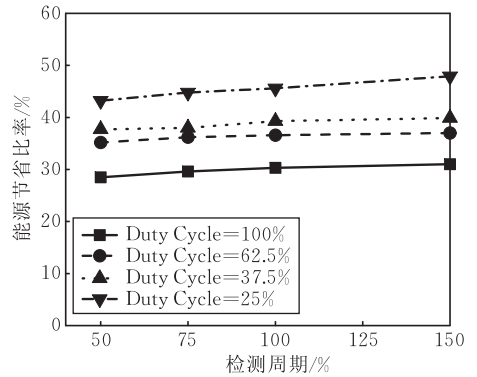


图 12 跟踪节点检测周期对能源节省比率的影响

图 12 描述了划分因子固定(为 0.8)时, 能耗节省比率随占空比及普通节点检测周期的变化情况. 占空比的变化对系统能量消耗影响更明显, 它决定了发现节点睡眠和工作时间的相对比率, 而节点处于工作状态消耗的能量是它处于睡眠状态时消耗能量的 11 倍<sup>[4]</sup>. 随着检测周期的增加, 能量节省率显著增加. 因为检测周期的增加不但使普通节点周期检测次数减少, 而且使处于睡眠状态的节点被唤醒的概率降低, 很大程度上降低了节点能耗.

图 13 比较了 TSSTP 与另外两种性能较好的能源有效跟踪算法 VigilNet<sup>[4]</sup> 和 MCTA<sup>[3]</sup> 的能量消耗情况. VigilNet 也在检测中引入节点调度机制, 而 MCTA 通过减少参与跟踪的节点数目达到降低能耗的目的. 实验结果表明当占空比低于 75% 时, TSSTP 和 VigilNet 的性能更好, 因为二者都采用睡眠机制, 较低的占空比可节省大量能耗. 然而, 随着占空比的增加, 这种优势被削弱. MCTA 从最小化参与节点通信量角度出发, 不受到占空比的影响, 当占空比较高时更具有优势.

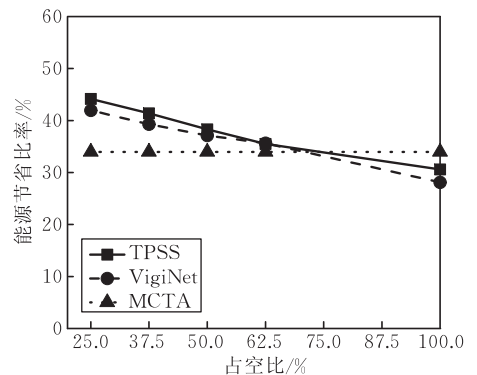


图 13 TSSTP、MCTA 和 VigilNet 算法能源节省比率比较

## 6 相关工作

无线传感器网络中目标跟踪技术得到了广泛研究,目前已经提出一些能源有效的跟踪方法<sup>[3-7,14-17]</sup>.文献[14-15]提出基于二位传感器模型的跟踪方法,可以有效减少通信量,然而该模型对网络的可靠性要求较高.文献[2]利用最小化等高线方法建立节点的感知和无线通信模型,最小化跟踪系统能量消耗.文献[16]提出一种分布式跟踪方法,利用动态传送树结构实现节点间协作.文献[17]提出利用信息驱动方法确定参与工作的节点,以限制网络内的通信量和节点资源耗费.

上述跟踪技术考虑到节省能耗的重要性,通过减少信息传送量或参与跟踪节点的个数,尽量使节点空闲,以达到降低能耗的目的.然而,这些空闲的节点仍然消耗能量,尤其对于长期运行的监测系统来说,该部分能耗不可忽略.

鉴于上述问题,提出了将节点睡眠机制应用于跟踪系统<sup>[4-6]</sup>,该方法可显著地节省网络能量.文献[4]提出检测和循环工作相结合的调度方式,使节点轮流工作.文献[5]提出一种优化的睡眠调度协议,用于检测低概率事件.该协议在保证跟踪质量的同时使节点轮流工作对目标进行检测.文献[6]基于网络覆盖的冗余性,提出有效的睡眠唤醒协议.

上述基于节点调度的跟踪方法假设网络布置具有一定的冗余,使部分冗余节点轮流工作,这是以牺牲跟踪质量为代价的.本文根据不同跟踪阶段对节点密度要求的不同,采用不同的节点调度机制.在目标发现阶段,选择小部分节点周期性工作以发现目标所在区域并唤醒目标周围节点,大部分节点保持睡眠状态.在目标跟踪阶段,被唤醒的节点保持工作状态,协同计算目标的准确位置.完成跟踪后返回第1阶段的状态.上述调度机制不但可以对目标位置的改变做出快速响应,而且保证足够的节点获得目标感知数据,同时节省网络能量消耗.

## 7 结 论

本文在目标跟踪协议中引入睡眠调度机制,以减少系统能耗.为了在保证跟踪质量的同时尽量降低目标跟踪的能耗,文中采用两阶段睡眠调度协议.该协议可以根据不同跟踪阶段对节点密度要求的不同,动态调度节点.为提高协议性能,进一步从发现

节点选择和节点状态预测角度对所提出协议进行了优化.

最后,在36个传感器节点组成的小型网络中验证了所提出协议.实验结果表明文中方法可以有效节省系统能量同时保证对一定跟踪质量的需求.与其他相似技术相比,文中方法在节约系统能源上也具有一定优势.

## 参 考 文 献

- [1] Ding M, Cheng X Z. Fault-tolerant target tracking in sensor networks//Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2009). New Orleans: ACM, 2009: 125-134
- [2] He T, Vicaire P, Yan T, Luo L, Gu L, Zhou G. Achieving real-time target tracking using wireless sensor networks//Proceedings of the 12th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2006). Bellevue: ACM, 2006: 37-48
- [3] Jeong J, Hwang T, He T, Du D. MCTA: Target tracking algorithm based on minimal contour in wireless sensor networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (Infocom 2007). Anchorage: IEEE Computer Society, Anchorage, 2007: 2371-2375
- [4] Vicaire P, He T, Cao Q, Yan T, Zhou G, Gu L, Luo L, Stoleru R, Stankovic J A, Abdelzaher T. Achieving long-term surveillance in VigilNet. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2009, 5(1): 1-39
- [5] Cao Q, Abdelzaher T, He T, Stankovic J. Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection//Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005). Los Angeles: IEEE Computer Society, 2005: 20-27
- [6] Gui C, Mohapatra P. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks//Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2004). Philadelphia, USA, 2004: 129-143
- [7] Dutta P, Grimmer M, Arora A, Bibyk S, Culler D. Design of a wireless sensor network platform for detecting rare, random, and ephemeral events//Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005). Los Angeles, 2005: c
- [8] D'Costa Ashwin, Sayeed Akbar. Collaborative signal processing for distributed classification in sensor networks//Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2003). Palo Alto, CA, USA, 2003: 193-208
- [9] Li D, Wong K, Hu Y, Sayeed A. Detection, classification and tracking of targets in distributed sensor networks. IEEE

Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 17-29

- [10] McErlan D, Narayanan S. Distributed detection and tracking in sensor networks//Proceedings of the 36th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA, 2002; 1174-1178
- [11] Shrivastava N, Mudumbai R, Madhow U, Suri S. Target tracking with binary proximity sensors; Fundamental limits, minimal description, and algorithm//Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2006). Boulder, Colorado, USA, 2006; 251-264
- [12] Singh J, Madhow U, Kumar R, Suri S, Cagley R. Tracking multiple targets using binary proximity sensors//Proceedings of the 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2007). Cambridge, 2007; 529-538

- [13] Zhang W S, Cao G H. DCTC: Dynamic convey tree-based collaboration for target tracking in sensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2004, 3(5): 1689-1701
- [14] Zhao F, Shin J, Reich J. Information-driven dynamic sensor collaboration for tracking applications. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 61-72
- [15] Srinivas A, Zussman G, Modiano E. Mobile backbone networks construction and maintenance//Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (Mobihoc 2006). Florence, 2006; 166-177
- [16] Gonzalez T. Covering a set of points in multidimensional space. Information Processing Letters, 1991, 40: 181-188
- [17] Ross S M. Introduction to Probability Models. 9th Edition. Berkeley, California: Academic Press, 2006



**REN Qian-Qian**, born in 1980, Ph. D. candidate. Her research interests focus on wireless sensor networks.

**LI Jian-Zhong**, born in 1950, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include data mining, data stream and wireless sensor networks.

**GAO Hong**, born in 1963, professor, Ph. D. supervisor. Her research interests focus on data mining, data warehousing and XML data management.

**CHENG Si-Yao**, born in 1982, Ph. D. candidate. Her research interests focus on wireless sensor networks.

## Background

This paper focuses on the research of target tracking in wireless sensor networks. Target tracking is an important issue of wireless sensor networks. It has been applied in various areas such as disaster predication, emergency response and battlefield surveillance, etc. In these applications, a large number of sensors are deployed in danger or non-arrival environments, it is unable to replace or recharge power sources, so energy is a key factor. Several research works have been done for energy efficient target tracking in wireless sensor networks. Their solutions focus on reducing transmission amounts or the number of nodes participating in work. While the nodes that do not work still consume energy, and these consumptions cannot be ignored for the long-term surveillance. Some methods have been proposed to apply node scheduling in object tracking systems, they can save energy consumption of networks obviously. By exploiting the redundancy of nodes coverage, they make redundant nodes sleep, or rotate them in work. This scheme is on price of tracking quality in terms of detection delay and tracking precision. In the approach proposed in this paper, the authors schedule

nodes according to the different tracking phase, it provides not only fast response to the object, but sufficient nodes to perform localization task, meanwhile saves the energy consumption.

This work was supported in part by the National Grand Fundamental Research 973 Program of China, the Key Program of National Natural Science Foundation of China, the NSF of China and the NSFC-RGC of China. These foundations focus on the research of various areas of sensor networks, including energy efficient protocols, clustering, coverage and connectivity, routing protocols, data gathering, fusion, and dissemination, resource management, cross layer design and optimization, etc. The group has been working on the research of wireless sensor networks for many years, and many good papers have been published in worldwide conferences and transactions, such as VLDB, ICDE, INFOCOM, TKDE and so on. This paper proposes an energy efficient tracking protocol, it gives a solution on topic of energy efficient protocols.