

## An Updating Scheme of the Working Dynamic Coalition for Collaborative Task Allocation in Wireless Sensor Networks \*

CHEN Jian-xia<sup>1,2</sup>, YU Hai-bin<sup>1\*</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. Graduate School Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The research of collaborative task allocation is an important part in the study of wireless sensor networks which orient the application of target tracking and so on. Different allocation schemes can affect the performance and energy consumption to a great extent. The dynamic-coalition-based task allocation scheme is applicable to the wireless sensor networks with infrequent tasks. To improve the dynamic-coalition-based task allocation scheme, this paper introduces the concept of the cover area of the dynamic coalition and the sleeping member in the dynamic coalition to get rid of more redundant working nodes to save more energy. Furthermore, a updating scheme of the working dynamic coalition in the collaborative task allocation with the cushion band updating program to perform the re-allocation of the task is proposed. The succession of the task execution is assured to obtain better performance. The efficiency of the scheme is proved in the simulation. And the impact of the width of cushion ring in the mobiling dynamic coalition scheme is simulated also.

**Key words:** wireless sensor networks; collaborative task allocation; dynamic coalition scheme; sleeping member; the updating scheme of the dynamic coalition

EEACC:6150P

## 一种面向无线传感器网络协同 任务分配的动态联盟更新机制 \*

陈剑霞<sup>1,2</sup>, 于海斌<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 在面向目标追踪等应用的无线传感器网络研究中, 协同任务分配机制的研究是很重要的。基于动态联盟机制的协同任务分配方法是事件触发的, 适用于任务出现频率相对较低的大规模无线传感器网络。本文在基于动态联盟机制研究的基础上, 首先引入了联盟覆盖范围和休眠盟员的概念, 进一步消除针对同一任务的检测传感器节点的冗余, 降低系统的能量消耗; 而后又给出了一种动态联盟的更新机制, 以保证动态联盟执行任务时的连续性, 在一定程度上保证网络的检测性能。最后通过仿真, 从系统总能耗、目标捕获率和检测误差标准差等方面检验了算法的性能, 并给出了缓冲带宽度等参数对能耗和网络检测性能的影响。

**关键词:** 无线传感器网络; 协同任务分配; 动态联盟机制; 休眠盟员; 联盟更新机制

中图分类号: TP393.03

文献标识码: A 文章编号: 1004-1699(2009)04-0499-06

无线传感器网络是由大量具有通信与计算能力的微小传感器节点构成的“智能”自治测控网络系统, 一般密集布设在无人值守的监控区域, 能够根据环境自主完成指定任务。无线传感器网络本质上是个分

布式系统: 网络中的节点只有局部信息, 能力有限, 单个节点无法独立完成复杂任务, 需要多个节点协同工作。因此无线传感器网络中需要协同任务分配, 即要确定在传感器节点的协同过程中, 由哪些节点来完成

基金项目: 国家自然科学基金资助(60704046); 国家杰出青年基金资助(60725312); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助(2007AA04Z173)“无线 HART 网络关键技术研究与原型开发”

收稿日期: 2008-12-12 修改日期: 2009-02-07

特定的任务<sup>[1]</sup>。在无线传感器网络协同任务分配的研究中,很多时候需要考虑网络能耗和网络性能的折衷,好的协同任务分配方案以尽可能低的能耗成本换取满足应用需要的测控结果,从而在满足网络性能要求的同时,尽量延长网络的生命周期<sup>[2-3]</sup>。

在当前无线传感器网络协同任务分配机制的研究中,动态联盟或反应式成簇机制占据了重要的地位。动态联盟或反应式成簇机制是基于事件触发的,能够针对任务情况动态协同任务分配,此类方法在网络任务目标出现频率较低的监控网络中相对适用<sup>[4]</sup>。Leen Kiat Soh 等人提出了基于案例推理的动态联盟机制,首次将动态联盟机制用于解决无线传感器网络的协同任务分配问题<sup>[5]</sup>;刘梅等人提出了一种基于动态规划建立动态联盟的方法,以实现无线传感器网络的协同任务分配,解决了多个动态联盟间的传感器资源竞争冲突<sup>[6]</sup>;Yingyue Xu 等则给出了一种反应式分布成簇机制,在仿真中验证了基于事件触发的任务分配机制的适用范围<sup>[4]</sup>;文献[7-8]给出了基于拍卖的动态联盟机制以及基于仲裁的联盟成员更新机制,改进了文献[5]中的算法,加入了拍卖机制和基于仲裁的盟员更新机制,节约了网络运行能耗,并在一定程度上保证了网络的检测性能。

本文在动态联盟机制研究<sup>[7-8]</sup>的基础上,给出了一种面向无线传感器网络协同任务分配的动态联盟更新机制。移动动态联盟机制:首先加入了联盟覆盖范围和休眠盟员的概念,将位于联盟覆盖范围内的非工作盟员设定为休眠盟员,可以进一步降低网络执行任务期间的能量消耗;而后又加入动态联盟的更新机制,以消除由于联盟衔接期间网络对任务的暂时“失明”,保证动态联盟执行任务时的连续性,从而在一定程度上保证网络的检测性能。

## 1 问题的描述

在当前的动态联盟机制中,动态联盟的成员节点都是执行任务的工作节点,其他传感器节点并不包含在动态联盟之内。所以在动态联盟组建并工作以后,可能还会有其它检测到任务的节点针对同一任务组建新的动态联盟,而这些联盟的检测区域严重重叠,从而造成能量和资源的浪费。如图1所示,黑色节点为动态联盟  $D_1$  的盟员,白色节点和浅灰色节点分别为  $D_2$ 、 $D_3$  的盟员,则同一时刻有至少  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  三个动态联盟检测同一小车,这无疑造成了能量和资源的极大浪费。

为了解决以上问题,本文引入了联盟覆盖范围和

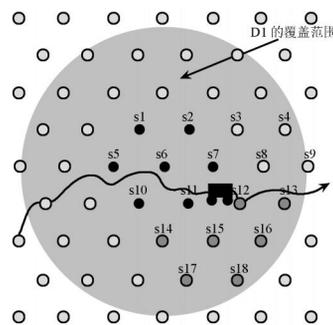


图1 无休眠盟员的动态联盟机制

休眠盟员的概念,将联盟成员划分为工作盟员和休眠盟员两种。盟主在选定工作盟员以后,计算工作盟员的综合覆盖范围,作为联盟的覆盖范围,半径为  $r_c$ ;将联盟覆盖范围内的传感器节点统统招募为联盟成员,联盟内的非工作盟员设定为休眠盟员。休眠盟员存储盟主信息以后进入休眠状态,并在当前联盟解散以前不再组建新的联盟。这样可以保证任务在联盟覆盖范围以内时,只有一个联盟负责检测,从而节省了能量和资源。即当节点  $s_6$  发现目标,组建动态联盟  $D_1$ ,计算其工作盟员的覆盖范围(灰色圆形区域),则该圆形区域内的其他节点均为该联盟的休眠盟员,在收到来自盟主节点  $s_6$  的联盟解散消息前,不再组建其他动态联盟。这样在目标位于  $D_1$  覆盖范围内时,不再存在其他动态联盟检测同一目标,从而节省了能量和资源。

但是休眠盟员和联盟覆盖范围的设定带来了新的问题:如果在  $t_0$  时刻,任务移出联盟  $D_1$  的覆盖范围,联盟  $D_1$  以外的传感器节点才开始组建新的动态联盟  $D_{new}$ 。若组建联盟需要的时间为  $t_{con}$ ,联盟  $D_{new}$  在  $t_0 + t_{con}$  时刻组建成功,开始执行任务。则在  $(t_0, t_0 + t_{con})$  时间段内,现有联盟  $D_1$  无法执行该任务,没有了联盟  $D_2$ 、 $D_3$  的后备保证,新联盟  $D_{new}$  又尚未组建成功,则该时间段内没有联盟执行该任务,网络对该任务暂时“失明”,从而使网络的检测性能受到极大影响。

为了解决这一问题,本文给出了一种动态联盟的更新机制,引入缓冲带和缓冲带盟员的概念。缓冲带区域是位于联盟覆盖区域的外围,宽度为  $r_{cushion}$  的封闭等宽带状区域, $r_{cushion}$  定义为缓冲带宽度;联盟覆盖范围内侧区域定义为联盟核心区域半径为  $r_{cen}$ ,则有联盟覆盖范围半径  $r_c = r_{cushion} + r_{cen}$ ,如图2所示。位于缓冲带区域的非工作盟员为缓冲带盟员,联盟正常工作时缓冲带盟员处于休眠状态;当任务移至缓冲带区域时,启动联盟更新程序,缓冲带盟员被唤醒,竞争组建新的联盟  $D_{new}$ ;若在任务移出  $D_1$  的覆盖范围之前完成联盟更新动作,就可以

消除联盟对任务的暂时“失明”,保证任务执行的连续性,从而确保检测性能满足用户需求。

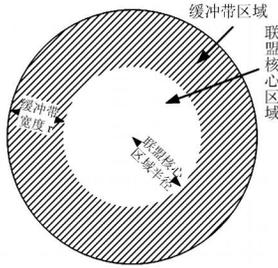


图2 缓冲带示意图

在移动式动态联盟机制中,由于休眠盟员的存在,在一定程度上消除了检测节点的冗余,从而降低了网络能耗;然而另一方面,无线传感器网络节点不可靠等特性需要一定程度的冗余来提高系统的检测性能,冗余的消除又使得网络的检测性能有所下降。所以在设计实际应用网络的时候,应该根据网络需求选择适当的协同任务分配机制以及缓冲带的宽度等,从而在获取足够的检测性能指标的同时,尽可能的降低网络能耗。

## 2 带有休眠盟员的移动式动态联盟机制

带有休眠盟员的移动式动态联盟机制(以下简称移动式动态联盟机制)的工作过程可分为三个阶段:联盟组建阶段,联盟更新阶段,联盟解散阶段。

若在时刻,网络中有任务出现,则协同任务分配的具体过程如下述:

### 联盟组建阶段

时刻,网络中的节点发现任务出现,根据基于概率的选举,采用拍卖机制发起组建动态联盟。

节点发现任务出现之后,等待随机一段时间,如果在此期间没有收到来自其他节点组建联盟的竞选消息,则自己着手组建联盟,广播竞选消息,将自己的id、任务信息等发布出去,进入竞选状态。

收到竞选消息的节点查看任务信息,评估自己的能力,如果满足投标条件,则给出自己的代价函数等,发出投标消息。

一定时间后,竞选节点根据各投标节点的代价函数等,对投标节点进行评估,从中选择工作盟员,将任务分配给各工作盟员;计算工作盟员的综合覆盖范围,设为联盟的覆盖范围。

向联盟覆盖范围内的所有节点发出确认联盟消息,消息包含自身id,工作盟员列表,工作盟员中的任务分配方案等内容;自身提升为联盟盟主。

收到确认联盟消息的节点查看工作盟员列表:

\*列表中的节点提升为工作盟员,读取任务分配方案,开始工作。

\*如果节点不属于工作盟员列表,则为休眠盟员:位于联盟核心区域的休眠盟员设定为普通休眠盟员;位于缓冲带区域内的休眠盟员设定为缓冲带盟员。

\*所有休眠盟员存储盟主信息,进入休眠状态。

联盟进入工作状态:

\*工作盟员将检测到的任务信息发送给盟主;

\*盟主负责进行数据融合,得出综合任务信息;

\*盟主根据用户要求,将综合任务信息发送到sink节点。

### 联盟的更新阶段

在 $t_0$ 时刻,盟主根据任务综合信息,确定目标进入缓冲带区域,则发出请求更新消息,唤醒缓冲带盟员。

收到请求更新消息的缓冲带盟员开始检测。检测到任务信息的节点,随机等待一段时间后,启动联盟更新程序;根据基于概率的选举,采用拍卖机制,选择新的工作盟员,确定新的联盟覆盖范围和联盟核心区域,向新的联盟覆盖范围内的节点发布联盟更新消息;联盟更新消息包含自身id以及相关信息,原盟主id,新的工作盟员列表,新的工作盟员中的任务分配方案,新联盟核心区域等内容,并将提升自己为盟主。

收到联盟更新消息的传感器节点查看自己状态。如果既不是盟员也不是盟主,则根据工作列表更新自身状态;如果自身状态为盟员,则查看原盟主id。如果与自己当前盟主id一致,则更新盟主信息,并根据工作盟员列表更新自身状态。

此时新的联盟进入工作状态。

当前盟主节点收到联盟更新消息,根据新的工作盟员列表更新自身状态,将任务相关信息传递给新的盟主节点,并广播联盟解散消息。

收到联盟解散消息的盟员节点查看消息发送节点的id。如果与自身盟主id一致,则更改自身状态为初始化状态。

这样,如果缓冲带的宽度合理,就可以保证在任何时刻检测任务都处于联盟覆盖范围之内,确保任务执行的连续性,提高网络的检测性能。

### 联盟解散阶段

如果盟主一段时间没有得到任务信息,并且确定目标没有移出缓冲带区域,则认定任务结束,由盟主发出联盟解散信息,联盟解散。

### 缓冲带宽度的确定

在基于移动式动态联盟机制的无线传感器网络协同任务分配方法中,参数缓冲带宽度的选择对算法性能有很大影响。如果缓冲带过窄,可能联盟更新尚未完成,任务就已经移出联盟覆盖范围,造成检

测任务执行的不连续,从而降低网络检测性能;如果缓冲带过宽,则可能造成联盟的更新过于频繁,从而浪费能量和网络资源。所以合理选择缓冲带宽度,是获取理想网络性能的关键。

传感器网络是基于应用的网络,一般在设计网络时,网络中任务类型大致确定,任务的移动速度区间大致可以预估。

假定预估的任务移动速度  $v_t$  ( $v_L, v_H$ ),更新联盟需要的最大时间为  $t_{H,con}$ ,则设置缓冲带宽度  $r = v_H \times t_{H,con}$ 。

若某盟主节点在融合任务信息,得出的任务移动速度  $v_t = v_H > v_H$ ,则更新缓冲带宽度  $r = v_H \times t_{H,con}$ ,同时更新任务移动速度最大值  $v_H = v_H$ 。

这样在任意时刻,任务都处于联盟的覆盖范围内,从而保证了对检测任务执行的连续性。

### 3 仿真

本文以无线传感器网络目标追踪为背景,使用 VisualSense 仿真平台,在不同网络节点密度和不同目标速度条件下,对本文给出的移动式动态联盟机制算法与文献[7]的无休眠动态联盟机制和文献[8]的拍卖式动态联盟机制算法进行了仿真比较。而后又针对移动式动态联盟机制,比较了不同的缓冲带宽度对网络检测效果和网络能量消耗的影响。

#### 3.1 仿真设置

在仿真中,传感器节点以三角阵的形式布设在  $720\text{ m} \times 720\text{ m}$  的正方形区域内,传感器节点的通信距离可调( $0 \sim 375\text{ m}$ )。以移动的声源为检测目标,声源每秒发出一个声音信号,声音信号的覆盖范围为  $150\text{ m}$ ,即距离声源  $150\text{ m}$  的传感器节点能够检测到声源的存在。声源沿半径为  $200\text{ m}$  的圆做圆周运动。网络在每次声源目标发出声音信号后,检测声源目标,得出该时刻目标位置,并将该时刻目标位置发送给 sink 节点。

仿真实验中我们作了几点假设:

无线传感器网络的通信能耗远远大于计算能耗,因此在算法评估时只考虑通信能耗,忽略计算能耗;

网络中的传感器节点具有简单的计算和存储能力,能够检测声音信号,判别出目标信号的有无,记录检测到目标信号的时间;

忽略通信冲突对算法的影响;

假定网络节点时间同步,网络中的传感器节点能够获取自己的位置信息;

采用三角定位,根据三个节点的位置和检测到目标信号的时间来确定目标的位置。

#### 3.2 性能评价指标

能效和网络检测性能是衡量协同任务分配机制的两项重要指标,获取两者之间的平衡是无线传感器网络协同任务分配机制研究的主要目的。本文分别用网络总能耗和目标捕获率、检测误差标准差来衡量协同任务分配机制的能效和网络检测性能。

##### 3.2.1 网络总能耗

网络的总能耗为仿真时间内所有节点通信能耗的总和。在进行无线通信时,节点每接收一个数据包时消耗的能量为

$$E_{rx} = k \times E_{elec} \quad (1)$$

发送一个数据包的能量消耗为

$$E_{tx} = k \times E_{elec} + k \times \text{amp} \times d^2 \quad (2)$$

其中, $k$ 为数据包的长度, $d$ 为数据包的传输距离, $E_{elec}$ 和  $\text{amp}$ 由无线信道模型决定,一般情况下, $E_{elec} = 50\text{ nJ/bit}$ ,  $\text{amp} = 100\text{ pJ/(bit} \cdot \text{m}^{-2})^{[9]}$ 。

为了便于统计,在仿真中假定  $k$ 为定值,并以  $E = 100 \times E_{rx}$ 为1个能量单位,计算能量消耗的相对值。这样节点每接收一个数据包,能耗为  $0.01$ 个能量单位;每发送一个数据包,能耗为  $E_{tx}/E$ 个能量单位。

##### 3.2.2 目标捕获率

目标捕获率是衡量网络检测性能的指标。在仿真时间  $t$ 内,声源目标每隔一定时间段  $t_{slot}$ 就会发出一个声音信号,则目标在  $t_{total} = t/t_{slot}$ 个时刻发出了声音信号。在某些时刻,网络测得了声源的位置,叫做捕获目标时刻,共计  $t_{catch}$ 个时刻;而在其它时刻,网络没有测得目标的位置,叫做目标丢失时刻,共计  $t_{miss} = t_{total} - t_{catch}$ 个时刻。则系统的目标捕获率和目标丢失率为

$$r_{catch} = \frac{t_{catch}}{t_{total}} \quad (3)$$

$$r_{miss} = \frac{t_{miss}}{t_{total}} = 1 - r_{catch} \quad (4)$$

##### 3.2.3 检测误差标准差

本文的仿真是对某时刻进入网络的目标进行定位追踪,需要采用检测误差标准差来衡量系统的检测性能。检测误差标准差为

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (5)$$

其中: $n$ 为捕获目标的时刻数; $e_i$ 为第  $i$ 个捕获目标时刻的检测误差。在本文仿真中,定位误差主要是由三角定位算法引起的。

#### 3.3 仿真结果及分析

图3~图5给出了网络采用移动式动态联盟机制时,动态联盟核心区域半径不同时的仿真结果。仿真中,网络节点数  $n = 196$ ,目标角速度  $v = 2 \times /$

(108 × 2) rad/s。从图中可以看出动态联盟核心区域半径的变化没有影响到网络的检测误差标准差;随着联盟核心区域半径增大,即缓冲带宽度的减小,网络总能耗也随之降低,但是目标捕获率也有所下降。这是因为缓冲带较宽时,联盟更新程序启动频繁,使能耗增加;缓冲带较窄时,新旧联盟交接处出现空白,造成目标丢失,降低目标捕获率,从而影响网络的检测性能。

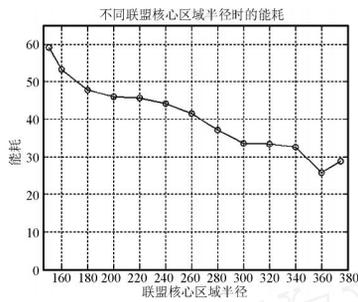


图 3 不同联盟核心区域半径时的能耗比较

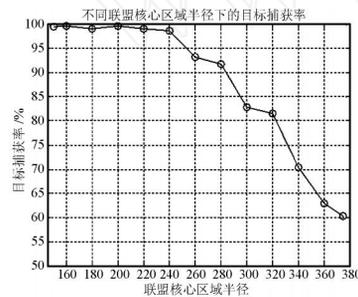


图 4 不同联盟核心区域半径时的目标捕获率

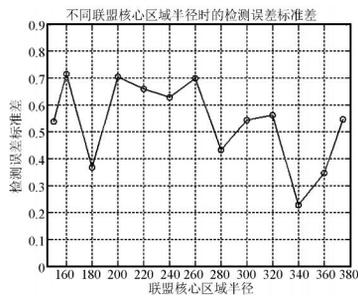


图 5 不同联盟核心区域半径时的检测误差标准差

在仿真中,联盟覆盖范围半径  $r$  大约为 300。当联盟核心区域半径  $r = 300$  时,目标捕获率不到 80%,性能较差;当  $r = 280$  时,目标捕获率就可以达到 90% 以上,而此时的网络能耗比  $r = 200$  时减少了近 20%;而为  $r = 240$  以内时,目标捕获率达到 98% 以上,能耗有所增加,依然要比  $r = 160$  时节能 25% 左右。网络总能耗、目标捕获率与缓冲带的宽度之间都是非线性关系。在网络设计时,可以根据实际网络需求,选取合适的联盟核心区域半径,从而获取目标捕获率与能耗的折衷。

图 6 ~ 图 8 给出了网络节点密度不同时,移动式动态联盟机制与无休眠机制和拍卖式动态联盟机制

的仿真比较(目标角速度  $v = 2 \times / (108 \times 2)$  rad/s)。

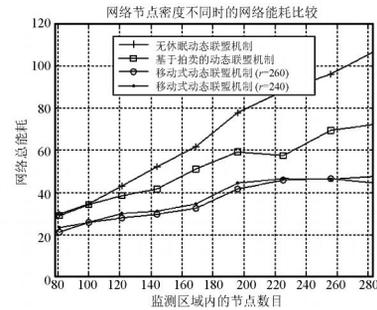


图 6 不同网络节点密度时的网络能耗

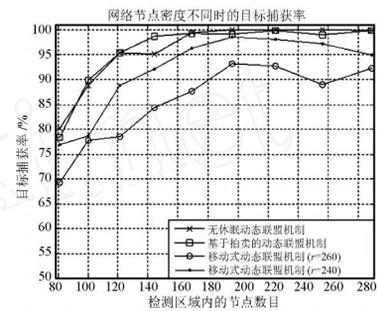


图 7 不同网络节点密度时的目标捕获率

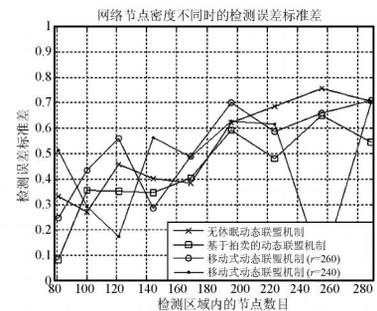


图 8 不同网络节点密度时的检测误差标准差

从图中可以看出随着检测区域内网络节点数的增加,三种算法的检测误差标准差略有增大;网络总能耗和目标捕获率也随之增加。无休眠机制和基于拍卖的动态联盟机制在节点数目超过 100 后,目标捕获率就可以稳定在 90% 以上;而移动式动态联盟机制则需要较大节点密度来获取相应的目标捕获率,  $r = 240$ , 监测区域内节点数  $n \geq 196$  时,目标捕获率接近其它两种机制,但是此时的网络能耗只有其他两种机制的 50% 左右。

图 9 ~ 图 11 针对不同的目标速度,对移动式动态联盟机制与无休眠机制和拍卖式动态联盟机制进行仿真评估。仿真中,网络节点数  $n = 196$ 。从图中可以看出在仿真涉及的范围内,目标速度对系统检测性能和能耗的影响不大。随着检测区域内网络节点数的增加,三种算法的检测误差标准差略有增大,网络总能耗也稍有增加。这是因为随着目标速度的增加,目标在网络中走过的路程变大,检测时需要构建更多的联盟而耗能。网络的目标捕获率只在目标

速度增加到一定程度时稍有下降。

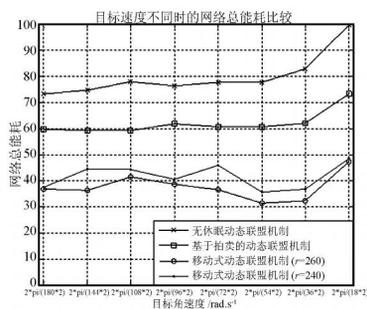


图9 不同目标速度时的网络总能耗比较

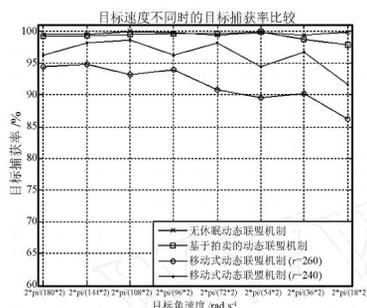


图10 不同目标速度时的目标捕获率比较

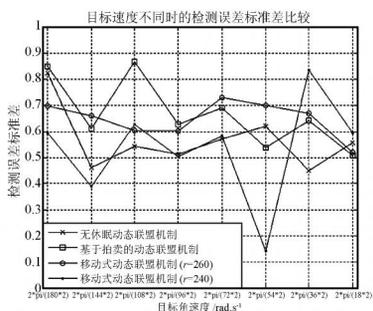


图11 不同目标速度时的检测误差标准差

从图6~图11可以看出,与其它两种机制比较,移动式动态联盟机制的目标捕获率有所下降,但是耗能只有无休眠动态联盟机制的一半,同时远远小于基于拍卖的动态联盟机制。这是因为休眠盟员的存在,在一定程度上消除了检测节点的冗余,从而降低了网络能耗;而另一方面,无线传感器网络节点不可靠等特性需要一定程度的冗余来提高系统的检测性能,冗余的消除又使得网络的检测性能有所下降。

### 4 结论

本文针对无线传感器网络的协同任务分配问



陈剑霞(1977-),女,中国科学院沈阳自动化研究所,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络协同信息处理, chenjianxia@sia.cn

题,加入了联盟覆盖范围和休眠盟员的设定,在联盟覆盖范围内非工作盟员节点设定为休眠盟员,以避免同时存在多个联盟执行同一任务,节省了网络能量和资源。继而给出了一种动态联盟更新机制,通过缓冲带和缓冲带盟员的设置,保证了联盟执行任务的连续性,在一定程度上保证了网络的检测性能。

但是从仿真中可以看出,该机制在消除冗余以节约能量的同时,在检测性能上还是做出了一定的牺牲。所以在设计实际应用网络的时候,应该根据实际网络需求选择适当的协同任务分配机制以及缓冲带的宽度等,从而在获取足够的检测性能指标的同时,尽可能的降低网络能耗。

### 参考文献:

- [1] 于海斌,曾鹏.智能无线传感器网络系统[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] Bhaskar Krishnamachari, Stephen Wicker, Ramon Bejar and Cesar Fernandez. On the Complexity of Distributed Self-Configuration in Wireless Networks[J]. In Kluwer Journal on Telecommunication Systems, Special Issue on Wireless Networks and Mobile Computing. 2003, 22(1).
- [3] 刘嵩,仲崇权,滕弘飞,周倩,宋本杰.无线传感器网络节点自适应睡眠调度算法 NASS 的研究与实现[J].传感技术学报,2008, 21(10):1755-1759.
- [4] Yingyue Xu, Hairong Qi. Decentralized Reactive Clustering for Collaborative Processing in Sensor Networks [C]// Proceedings of the Tenth International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS '04). 2004. 54-61.
- [5] Soh L K, Tsatsoulis C. Reflective Negotiating Agents for Real-Time Multisensor Target Tracking[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '01). 2001:1121-1127.
- [6] 刘梅,李海昊,沈毅.无线传感器网络空中目标跟踪任务分配技术的研究[J].宇航学报. 2007, 28(4):960-965,971.
- [7] 陈剑霞,臧传治,梁驊,于海斌.无线传感器网络动态协同任务分配机制[J].信息与控制.2006,35(2):189-192,200.
- [8] Chen Jianxia, Zang Chuanzhi, Liang Wei, Yu Haibin. Auction-Based Dynamic Coalition for Single Target Tracking in Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). 2006. 94-98.
- [9] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, Volume: 1, Issue: 4, 2002, 660-670.



于海斌(1964-),男,工学博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为工业通信与实时系统理论,分布控制系统技术,网络协同与智能制造, yhb@sia.cn