

## An Adaptive Target Tracking Protocol in Wireless Sensor Networks<sup>\*</sup>

PENG Yong, WANG Guojun<sup>\*</sup>, XING Xiaofei

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Target tracking is a foundational application in wireless sensor networks, and energy-efficiency is also an important goal for target tracking applications. An adaptive target tracking protocol is proposed. The states of sensor nodes are divided into sleep, monitoring and tracking states. We set the node weight for each sensing node which calculates its own weight value to decide whether to participate to the tracking of targets. This protocol reduces the number of participation target tracking nodes for a high level. At last, the leader nodes adjust the frequency of reporting according to the velocity of the target, which not only improves energy efficiency, but also enhance the tracking accuracy. The simulation results show that this protocol has a good performance in energy-efficiency.

**Key words:** wireless sensor networks; target tracking; energy-efficiency; target coverage

EEACC:6150M

## 无线传感器网络中一种自适应目标跟踪协议<sup>\*</sup>

彭 勇, 王国军<sup>\*</sup>, 邢萧飞

(中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 目标跟踪是无线传感器网络的一个基本应用, 而能量高效是目标跟踪研究的一个重要目标。提出了一种自适应目标跟踪协议, 该协议将传感器节点的状态分为睡眠状态、监测状态、跟踪状态三种状态; 并对每个进行感应的传感器节点设置了节点权值, 每个节点通过计算自己的节点权值来决策是否参与目标的跟踪, 它在很大程度上减少了参与目标跟踪的节点数量。领导节点根据目标的运动速度来自适应地调整数据报告的频率, 提高了能量利用率和跟踪精确度。模拟实验表明我们的算法具有良好的节能效果。

**关键词:** 无线传感器网络; 目标跟踪; 能量高效; 目标覆盖

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)03-0427-06

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 是由一组具有相似功能的传感器节点通过相互协作工作而构成的, 能够对大范围的区域进行有效监测, 因此被广泛应用于军事战场、环境监测、交通运输、医疗诊断等各个领域。目标跟踪是无线传感器网络中的一个基本应用, 由于移动目标运动的不确定性, 对移动目标进行高质量的定位跟踪成为一个极具挑战性的课题。

在传感器网络中, 使用地理上随机分布、相互协作工作的传感器节点进行目标跟踪具有精确度高、

实时性好和代价低等优点。然而, 由于传感器节点处理能力和能量的限制, 所以设计的目标跟踪协议既要能够准确地跟踪目标, 又要具有能量的高效性。无线传感器网络中能量高效是一个十分关键的问题, 它关系到网络使用寿命的长短。本文的研究适用于对重要目标的监测, 比如军事目标坦克的跟踪, 车辆运动、珍贵的野生生物生活习性等的监测。

目标跟踪的目的是获取目标运动轨迹及其运动状态, 如速率、方向等, 这个过程分为无目标监测和出现目标后的跟踪过程两个子过程。在进行目标跟

基金项目: 湖南省杰出青年科学基金资助(07JJ1010); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助(NCET-06-0686); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”资助(IR T0661)

收稿日期: 2008-11-06 修改日期: 2008-12-03

踪的过程中,很多的因素<sup>[1]</sup>影响到能量消耗,这些因素主要有:移动目标数量、目标移动速度、报告频率、目标数据精确度、采集数据频率等。很明显,移动目标数目增多,报告频率加快,目标数据精确度提高,采集数据频率加大,目标移动速度变快,都会增加网络中节点的能量消耗。

本文从能量高效的角度对单目标跟踪进行研究,保证在一定的目标跟踪精确度情况下,通过减少参与跟踪中的传感器节点数目,并根据目标的运动状态,动态地调整领导节点的数据报告频率,减少不必要的数据的发送与接收,从而达到跟踪方案能量高效的目标。

## 1 相关工作

无线传感器网络中的目标跟踪问题已经有了很多深入的研究。能量问题是无线传感器网络中的一个重要问题,它在很大程度上决定了网络的生存时间。很多相关的工作从不同的角度针对能量高效这一问题进行了研究,文献[2,4,13]分别利用预测机制路由策略来限制参与跟踪的传感器节点数目和发送的消息数。文献[3]使用双重预测的数据聚合和融合策略来减少网络中发送的数据量。文献[5,7]综合考虑跟踪质量与能量高效之间的平衡关系,在保证可接受的跟踪质量条件下,使传感器节点尽可能的处于睡眠状态。

文献[6]中提出的能量高效的目标跟踪协议使用了两个能量高效算法: RARE-Area 算法和 RARE-Node 算法,其中 RARE-Area 算法是针对低质量数据的产生问题,限制参与跟踪的传感器数量,只允许能产生一定质量的数据的传感器节点参与目标的跟踪。RARE-Node 算法,则是针对冗余数据问题,通过考虑相邻参与目标跟踪节点之间的空间关系,只将一个高质量的数据向上发送给簇头节点,从而避免了将冗余数据发送给簇头。

文献[8]提出分布式能量高效定位与跟踪算法,研究了基于距离比例的 RVI 定位问题,并提出自适应地调整领导节点发送报告的频率方案,减少了领导节点发送报告的次数,从而减少能量消耗。

文献[9-10]提出了动态护卫合作树的概念,动态护卫合作树是一颗基于树的合作框架,被用跟踪目标和监视目标的周围环境。在跟踪过程中通过重构护卫树,不断的添加与剪切节点,对移动目标进行了有效地跟踪。但是,在参与跟踪的节点中,有一些节点产生了低质量的、不必要的冗余数据,这就增大了处理中的数据量,增大了系统开销。本文正是基

于改进的动态护卫树的数据处理的基础上,提出了我们的自适应目标跟踪协议。

本文其它部分组织如下:第2部分建立系统模型,并对目标的运动状态进行了分析。第3部分,提出自适应目标跟踪方案。第4部分,通过模拟实验证实我们方案的能量高效性。最后对本文进行了总结并为以后的研究指出方向。

## 2 系统模型

在传感器网络中,传感器节点常常是密集分布的,为了节省能量,本文采用了基于 GAF (geographical adaptive fidelity)<sup>[11]</sup>的分簇算法把监测区域划分成虚拟单元格,每个节点根据其地理位置信息划入相应的单元格。在监测目标未出现的时候,网络在每个单元格中周期地选举一个簇头节点,只有簇头节点保持活跃状态,其簇内成员节点进入睡眠状态。当移动目标进入监测区域,簇头节点唤醒簇内成员节点。

### 2.1 传感器网络模型假设

本文假定所研究的无线传感器网络是同构的,即每个传感器节点具有相同的感应半径和通信半径。并且每个传感器节点还知道自己的地理位置,节点保存有所有直接邻居的路由信息。为了节省能量,每个传感器节点设置有睡眠状态、监测状态和跟踪状态。在本文中,我们只考虑节点通信消耗的能量,网络中节点发送和接收  $\text{packsize}$  bit 数据所消耗的能量  $E_T$  和  $E_R$  计算公式如下:

$$E_T = (E_{T\text{-elec}} + E_{\text{amp}} \times d^2) \times \text{packsize}$$

$$E_R = E_{R\text{-elec}} \times \text{packsize}$$

其中  $d$  表示源节点到目标节点的距离,  $E_{T\text{-elec}}$  和  $E_{R\text{-elec}}$  分别是传输电路和接收电路消耗的能量,  $E_{\text{amp}}$  为多路衰减模型的功率放大系数。(  $E_{T\text{-elec}} = E_{R\text{-elec}} = 50 \text{ nJ/bit}$ ,  $E_{\text{amp}} = 0.1 \text{ nJ/bit}$  )。

为了获取目标的位置,本文使用三边测量法<sup>[12]</sup>对目标进行定位。如果一个节点监测到移动目标并且还接收到另外两个或两个以上的邻居节点监测到的信息,该节点就能够计算出移动目标的位置。

### 2.2 节点状态转换

传感器节点状态分为睡眠、监测和跟踪三种状态。睡眠状态,节点关闭通信模块,能量消耗最小;监测状态,即节点对周围环境进行监测,例如移动目标是否出现,计算目标与节点的距离等,但不进行数据包的发送;跟踪状态,即节点不仅负责对周围环境的监测,判断是否有移动目标的出现,收集移动目标的信息数据,还要进行数据包的发送与接收,能量消

耗最大。传感器节点的三种状态的转换关系如图 1 所示。

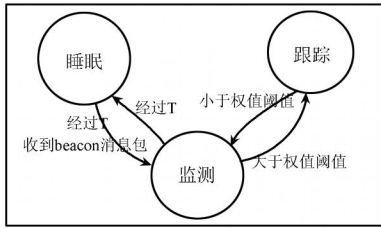


图 1 节点状态转换

节点状态转换机制如下:睡眠状态的节点经过时间周期  $T$  自动向监测状态转换;或者在睡眠周期内,睡眠节点接收到一个来自簇头或邻居节点的 beacon 包,节点由睡眠状态转换为监测状态。监测状态是传感器节点的一个暂态,处于监测的节点计算节点权值,满足权值阈值的节点自动转换为跟踪状态;不满足权值阈值的节点在时间周期  $T$  后自动进入睡眠状态。跟踪状态的节点定期的计算节点自身的权值,如果节点的权值小于阈值  $w$ ,节点自动转换为监测状态,并且只有跟踪状态的节点可以发送 beacon 包;节点的跟踪状态和睡眠状态之间不能直接相互转换。

### 2.3 基于目标状态的节点权值计算

距离目标远的节点可能由于强干扰、高噪声、弱信号等原因所得到的监测数据质量不高,而距离目标近的节点得到的监测数据相对质量较高,因此为了减少获取低质量数据,则应该尽量减少距离目标远的节点参与目标的跟踪。一般来说,目标靠近节点比目标远离节点在传感器感应区域停留的时间长,因此目标靠近的节点应该具有更高的优先权参与目标跟踪。

表 1 节点权值分配表

权值类型	描述	权值分配
$w_D$	$d > R$	1
	$R < d < 2/3R$	2
	$1/3R < d < 2/3R$	3
	$d < 1/3R$	4
$w_{Dir}$	目标远离节点	- 1
	目标静止	0
	目标靠近节点	1

为了尽量减少距离目标远的节点参与目标跟踪,从而减少参与跟踪的节点数量,本文为每个非睡眠状态的节点设置了节点权值。节点权值分配情况如表 1 所示,  $R$  为目标的感应半径,由于噪声等其他因素的干扰,传感器节点能够感应到目标点有效范围在  $0 \sim 1.2R$  之间。 $D$  为目标到传感器节点的距离,

$w_D$  表示移动目标到传感器节点的距离所产生的距离权值,  $w_{Dir}$  表示由目标远离还是靠近传感器节点的趋势所产生的趋势权值,节点权值用  $w$  表示,其值如下计算:

$$w = w_D + w_{Dir}$$

由上面的节点权值计算公式知,当传感器节点距移动目标的距离  $d < 1/3R$ ,并且移动目标还继续靠近传感器节点时,传感器节点取得最大节点权值 5,具有获取最优监测数据能力;当传感器节点距离移动目标的距离  $d > R$ ,并且移动目标还继续远离传感器节点时,传感器节点取得最小节点权值 0,传感器节点不对移动目标进行跟踪。因此,为了得到更好的监测数据,并且能够减少参与跟踪的节点数量,设置权值的阈值  $w$ ,规定只允许大于阈值  $w$  的传感器节点才能够转换为跟踪节点,参与移动目标跟踪。当然,设置权值阈值可能是以牺牲跟踪目标的定位精度为代价的,权值阈值  $w$  设置越大,则意味着越少的节点参与跟踪,如果有节点出现意外而得到错误数据,则会导致目标的定位精度的下降。

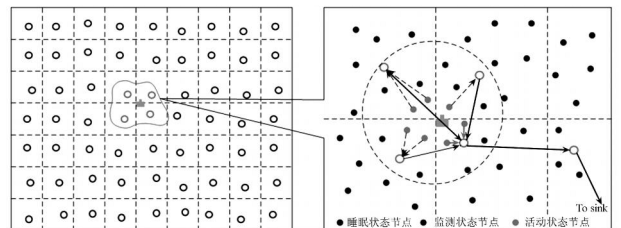


图 2 目标进入监测区域

## 3 自适应目标跟踪协议

当目标进入传感器节点监测区域,处于跟踪状态的簇头节点首先监测到目标,并向簇内所有睡眠状态的节点发送 beacon 包,唤醒这些节点进入监测状态,根据收集到监测对象的信息数据,节点分别计算自己的节点权值,达到节点权值阈值的节点自动转换为跟踪节点,参与移动目标的跟踪,如图 2 所示,参与跟踪节点将监测数据,包含有时间戳、节点 ID、节点与目标间的距离  $d$  的信息包发送到所在簇的簇头节点。

### 3.1 构造初始组

当目标进入一个簇头监测区域时,会向邻居簇头节点发送一个包含目标信息的数据包,所有监测到目标的簇都动态地在目标周围形成一个组,簇内成员节点只能与所在簇内节点通信,簇头与簇头之间可以相互通信。参与跟踪的簇的数量取决于网格半径的大小。例如,如果取网格边长等于节点的通信半径,那么最多只有四个簇能够同时监测到目标。

当出现同时有两个或两个以上的簇头同时监测到目标,我们选取这些簇中的一个簇头节点作为领导节点,簇头先向邻居簇头发送其与监测目标之间的距离数据信息,如果簇头收到一个距离目标更近的簇头发来的信息,放弃竞选成为领导节点。选取的标准为:首先,选择距离目标最近的簇头节点;其次,如果有两个或者两个以上的簇头节点与目标间的距离相同,选择剩余能量较大的那个充当领导节点。所有监测到目标的簇头节点都会将数据先发送到领导节点,然后由领导节点将数据进行计算和融合处理后发送到数据中心节点。

### 3.2 动态重建组

当移动目标远离领导节点时,由于需要将数据传送较远的距离才能送到领导节点,或者又有新的簇头节点监测到了目标时,这时领导节点已不再适用充当领导节点了,快速的选举出新的领导节点显得相当的必要。在这里我们规定,当有一个新的簇头节点加入移动目标的跟踪,根据领导节点选取规则,在所有参与跟踪的簇头节点中选取一个距离目标最近的簇头节点作为新的领导节点,数据报告将由新的领导节点发送到数据中心。

算法1 节点状态转换算法

```

Initialization;
If(目标出现){
  switch(节点状态)
  {case(睡眠状态)
    { if(收到 beacon 包) 进入监测状态;
      else 等待时间周期 T, 进入监测状态;
      break;
    }
  case(监测状态)
    {if(W > WLimit) 进入跟踪状态;
     else if(等待时间 T & & W < = WLimit)
       进入睡眠状态;
     else 保持监测状态;
     break;
    }
  case(跟踪状态)
    { if(W < = WLimit) 进入监测状态;
      else 保持跟踪状态;
      break;}
  }
}

```

节点的状态转换如算法1所示。跟踪节点和监测节点定期地计算自己的权值,当移动目标移动到一个新的地方,跟踪节点将被分为两种:一部分跟踪节点的权值因不再满足节点阈值要求而转为监测状

态;另外的跟踪节点仍然能保持原来的跟踪状态,参与移动目标的跟踪。

进入监测状态节点分为三种类型:第一种是监测节点由于目标的远离而不能感应到移动目标,在等待时间  $T$  后,节点将自动进入睡眠状态;第二种是监测节点由于目标的靠近而满足目标状态的权值阈值,转换为跟踪状态,参与移动目标的跟踪;最后一种是监测节点仍然能保持原来的监测状态。

随着目标的不断移动,通过预测目标的移动方向,由于预测机制不是本文讨论的重点,在此不作讨论,当监测节点变成跟踪节点时,此时节点向目标移动方向上它的直接邻居节点中的睡眠状态的节点发送 beacon 包,唤醒邻居睡眠节点并转换为监测状态。通过节点状态的不断变化,重新形成一个内圈由跟踪状态节点组成,外圈由监测状态节点组成的新组。

### 3.3 领导节点自适应数据报告

数据报告由应用需求决定,根据应用需要周期性地报告移动目标的信息数据,数据报告包含:发送报告的节点 ID、时间、目标的位置、速度、方向等信息。由于目标移动的不确定性,如果采取固定的数据报告频率,会造成一些不足:当移动目标速度加快时,定位精确度下降;当移动目标速度很慢时,采用仍是较高的频率,造成能量利用率不高;当移动目标长时间静止时,会导致领导节点连续工作时间较长,造成领导节点能量过早地耗尽,而导致网络使用寿命缩短。如果能够根据目标的移动状态自适应地参与目标跟踪,改变传感器节点的数据报告频率,将能够提高能量的利用率和跟踪过程中产生数据的精确度。

当新的簇头节点被选取成为领导节点,原来的领导节点会将最新的目标信息报告发送一份给新的领导节点,新的领导节点得到目标上一个时刻  $T_{pre}$  的位置  $Loc_{pre}$ ,还接收到簇头节点发送的最新数据,由定位算法得到目标在当前时刻  $T_{cur}$ ,目标新的位置  $Loc_{cur}$ ,由此得到目标的当前一段时间内的平均速率:

$$v = \frac{|Loc_{cur} - Loc_{pre}|}{T_{pre} - T_{cur}}$$

用  $D_{th}$  表示发送一次数据报告目标移动的最大位移,即使目标速度很小甚至为零,都应该向数据中心发送一次数据报告。领导节点根据平均速率  $v$  可以设定领导节点动态地发送数据报告的频率:

$$f = v D_{th} + 1$$

数据报告频率  $f$  为平均速率  $v$  对  $D_{th}$  取整,假设

网络中  $R_{max}$  为传感器节点的最大通信半径,  $R$  为传感器节点感应半径,  $D_{inter-sensor}$  表示领导节点能够跟踪到目标的最大距离。  $E_{max}$  表示最大定位误差, 其中<sup>[8]</sup> :

$$D_{th} \leq 2R_{max} - R - \frac{D_{inter-sensor}}{\sqrt{2}} - 2E_{max}$$

假设  $R_{max} = R = 40$  m(最坏情况),  $D_{inter-sensor} = 30$  m,  $E_{max} = 5$  m, 可以得到,  $D_{th} = 8.8$  m, 取  $D_{th} = 8$  m, 表示目标发送报告的频率为  $f = \frac{1}{8} + 1$ 。

### 4 模拟与性能评估

为了测试并评估我们的目标跟踪方案的性能, 本文在 OMNET++ 模拟平台上构建了一个由 1000 个节点组成的传感器网络场景。具体的模拟场景参数如表 2 所示。

表 2 模拟参数表

参数	值
模拟区域大小/m	600 ×600
节点数量	1000
节点通信半径/m	40.0
节点感应半径/m	40.0
目标移动速率/m · s <sup>-1</sup>	5.0 ~ 30.0
发送数据包大小/bit	1000

图 3 反映了移动目标在网络中以 10 m/s 的速度运动, 在不同的权值设置下的总能量消耗。从图中可以看到网络中总能量消耗会随着节点权值的增加而明显的减少, 这是因为节点权值越大, 意味着参与跟踪的节点与移动目标之间的距离阈值越小, 从而大量地减少参与跟踪的传感器节点数目, 也大大地减少了冗余数据或者低质量的数据的产生。  $W = 1$  表示移动目标在感应半径  $2/3R$  外并且远离节点或目标静止在感应范围外面, 网络消耗的能量大致相当于经典的 DCTC 跟踪算法在网络中消耗能量。显然, 当权值阈值增大时, 网络中能量消耗会显著下降。在图 3 中我们还可以看到, 取权值  $W = 3$  具有最优的目标跟踪精度。

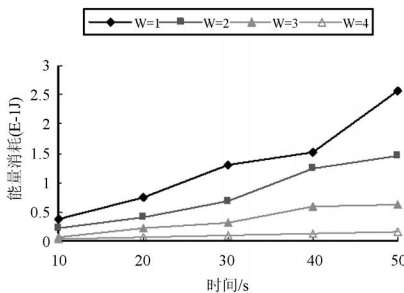


图 3 网络中不同节点加权值随时间变化总能量消耗

均消耗能量随移动速度的变化情况。从图中可以看出, 随速度增加, 网络中平均能量消耗也在增大, 但是增加的幅度并不是很大, 速度从 5 m/s 增加到 30 m/s, 幅度增加了 6 倍, 而平均能量消耗仅增加 2 倍。这是因为移动目标速度增加, 网络中簇头节点需要发送数据包来唤醒睡眠节点, 并且增加了目标到节点之间的距离。因此网络中平均能量消耗随目标移动速度增加而增加, 但是增加幅度缓慢。并且同样可以看到不同的权值之间网络平均能量消耗差距是比较大的。

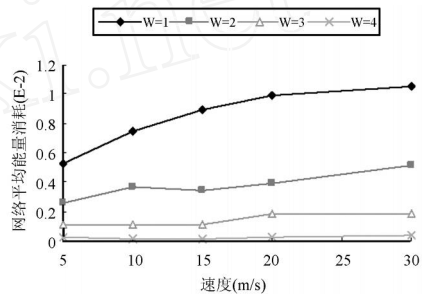


图 4 不同节点加权值随目标速度变化的网络平均能量消耗

### 5 结论

无线传感器网络目标跟踪应用研究中, 保持能量高效是影响网络寿命的一个重要因素。我们提出了一个自适应目标跟踪协议。通过将网络中传感器节点分为睡眠、监测、跟踪三个状态, 并且为每个处于活跃状态的节点赋予权值, 由该权值来决定该节点是否参与目标的跟踪, 从而减少了参与跟踪的传感器节点数目, 并且让领导节点根据移动目标的运动状态来自适应地调整发送数据报告的频率, 从而减少了需要发送的数据量。模拟试验表明我们的目标跟踪协议在网络整体能量消耗, 目标监测数据精度方面具有良好的性能。

### 参考文献:

- [1] Xu Y, Winter J, Lee W, Prediction-Based Strategies for Energy Saving in Object Tracking Sensor Networks[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Mobile Data Management, (MDM 2004), 2004:346-357.
- [2] Lee C W, Xu Y. On Localized Prediction for Power Efficient Object Tracking in Sensor Networks[C]// Proceedings of the 23rd International conference on Distributed Computers systems Workshops, 2003:434-439.
- [3] Wang G, Wang H, Cao J, Guo M. Energy-Efficient Dual Prediction-Based Data Gathering for Environmental Monitoring Applications [C]// Proceedings of the 2007 IEEE wireless Communications & Networking Conference (WCNC 2007), 2007:3516-3521.
- [4] Niyogi K, Mehrotra S, Venkatasubramanian N, Yu X, Adap-

- tive Target Tracking in Sensor Networks[C]// Proceedings of the 2004 Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference, 2004:253-258.
- [5] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing [J], Proceedings of ACM Mobile Computing and Networking, July 2001:70-84.
- [6] Elizabeth O, Wang G, Guo M, Dong M, RARE: An Energy-Efficient Target Tracking Protocol for Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of the 2007 International Conference on Parallel Processing Workshops 2007 (ICPPW 2007), 00:76-81.
- [7] Gui Chao, Mohapatra, Prasant, Power Conservation and Quality of Surveillance in Target Tracking Sensor Networks[C]// Proceeding of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 2004, 129-143.
- [8] Lee J, Cho K, Lee S, Distributed and Energy-Efficient Target Localization and Tracking in Wireless Sensor Networks[J], Proceedings of Computer Communications, Aug. 2006, 29: 2494-2505.
- [9] Zhang W, Cao G, DCTC: Dynamic Convey Tree-Based Collaboration for Garget Tracking in Sensor Networks[J], IEEE Transactions on Wireless Communication, 11(5), Sept. 2004: 1689-1701.
- [10] ZhangW, Cao G. Optimizing Tree Reconfiguration for Mobile Target Tracking in Sensor Networks [C]// Proceedings of IEEE InfoCom, 2004:2434-2445.
- [11] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography Informed Energy Conservation for Ad-Hoc Routing [J]. Proceedings of ACM Mobile Computing and Networking, July 2001:70-84.
- [12] Niculescu D, Nath B. Ad hoc Positioning System (APS) [C]// Proceedings of the 2001 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2001), 2001:2926-2931.
- [13] 王国军, 王田, 贾维嘉. 无线传感器网络中一种基于行进启发的地理位置路由 [J]. 传感技术学报, 2007, 20(2): 382-386.



彭勇(1983-),男,江西九江人,中南大学信息科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、目标跟踪;



邢箫飞(1979-),男,河南郸城人,中南大学信息科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、网络覆盖、路由协议.



王国军(1970-),男,湖南长沙人,中南大学信息科学与工程学院教授、博士、博士生导师、计算机应用技术系副主任、可信计算研究所所长,主要研究方向为容错与可信计算、移动计算、普适计算、软件工程;