

一种基于节点重要性和空间相关性的 无线传感器网络 MAC 协议*

刘放彩, 周四望, 李 兰
(湖南大学 软件学院, 长沙 410082)

摘要: 提出了一种新的基于节点重要性和空间相关性的 MAC 协议(NISC-MAC), 该协议将数据相关性小的节点, 即数据差异大的节点定义为重要节点, 并赋予其高的优先权。优先权高的节点发送数据的概率大, 退避时间短, 从而能优先地竞争到信道。把这些重要性节点选定为代表性节点, 确保这些重要的数据发送到 sink 节点, 这样可保证数据的整体有效性, 使收到的数据能更好地反映出物理现象。NISC-MAC 协议在去除数据空间相关性的同时确保了数据的整体有效性, 仿真实验表明此协议在较低的能耗和传输延时下确保了数据的整体有效性。

关键词: 无线传感器网络; 媒体访问控制协议; 空间相关性; 节点重要性

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)02-0664-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.02.072

Node importance and spatial correlation-based MAC in WSN

LIU Fang-cai, ZHOU Si-wang, LI Lan

(College of Software, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper proposed a new node importance and spatial correlation-based MAC protocol(NISC-MAC), which defined the smaller nodes interrelated, i. e., the nodes with great data difference, as the important nodes, and attributed it high priority. Those high priority nodes could send data with highly probability and backoff time shortly so that it was given highly priority in the competition to channel. And they could choose out the important nodes as the representative nodes, made sure those vital data send successfully to the sink node. This would ensure the overall effectiveness of data, made the data received reflect the real physical phenomenon. NISC-MAC is not only removal of spatial correlation of data, but also to ensure the overall effectiveness of data; the simulation experiment indicates the protocol ensure the overall effectiveness of data under low energy consumption and transmission delay.

Key words: wireless sensor networks(WSN); medium access control protocol; spatial correlation; node importance

0 引言

在无线传感器网络中, 一般会通过部署相对密集的节点来保证区域的覆盖和节点的冗余度, 以确保收集传感数据、可靠的通信和一定的网络生命周期。当节点越密集, 监测到同一事件的节点数越多, 各节点收集到的信息就有越高的相关度, 空间相关的信息导致的信道竞争就越多。而网络内的通信资源使用量很有限。无线传感器节点能量的消耗由三部分组成, 即数据的传感采集、处理和传输。在这三部分能量消耗中, 大部分能量消耗在数据传输的过程中, 所以在尽量保证应用需求的情况下, 在 MAC 层减少工作节点的数量, 将大大的减少数据的发送量, 节省很多传输能量。通过选择代表性节点发送数据, 去除了数据的空间相关性, 可以大量地减少数据的发送, 从而大大节省网络能量。最近有研究表明在大型的传感器网络中, 失真度、时空相关性和能量之间有一定关系, WSN 中数据有一定的空间相关性并且可以构建出相关性模型^[1]。

WSN 中, 单信道条件下, 所有传感器节点共享一个无线信

道, 信道资源是非常有限的, 因而需要一个有效的媒体访问控制(media access control)协议来协调各节点对信道的访问。没有 MAC 协议的协调, 多个节点就可能同时在无线信道上发送数据, 从而导致碰撞的发生。而普通的 MAC 协议一般不适合于无线传感器网络, 适合无线传感器网络中的 MAC 协议近年来国内外有了很多研究, 提出了多种适用于 WSN 的 MAC 协议^[2], 这些协议大致可以分为两类^[3], 即基于竞争模式(contention-based)^[4-6]和基于调度模式(schedule-based)^[7,8]。由于本文采用的是基于竞争模式, 下面仅讨论两种典型的基于竞争模式的 MAC 协议。

Sift-MAC^[4]协议是针对基于事件驱动的基于竞争的无线传感器网络 MAC 协议, 它的核心思想是采用 CW 值固定的窗口, 节点不是从发送窗口选择发送时槽, 而是在不同的时槽中选择发送数据的概率。节点在不同时槽选择不同的发送概率。S-MAC^[5]是一种最典型的基于竞争模式的协议, 它通过协商的一致性睡眠调度机制形成虚拟簇, 通过控制节点尽可能处于睡眠状态来降低能量的消耗。同时, 国内外学者对 WSN 中的空间相关性在 MAC 协议中的应用问题也开展了较为广泛深入的

收稿日期: 2009-06-07; **修回日期:** 2009-07-14 **基金项目:** 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ123)

作者简介: 刘放彩(1984-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络中的 MAC 协议和数据压缩(liufangcai2008@126.com); 周四望(1971-), 男, 湖南岳阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络中的数据压缩和信号处理; 李兰(1984-), 女, 福建福州人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络中的数据压缩。

研究^[1,4,9,10],提出了多种方案来选择一部分节点发送其传感数据,以此减少或消除各节点在 MAC 层的信道争用。

文献[1]中 CC-MAC 协议将整个网络划分为若干子区域,称为相关性区域,在每个相关性区域中同时仅选择一个节点发送数据,以降低或消除信道争用。文献[1]是在确保数据一定失真度($D_E(M)$)的前提下共选择 M 个代表节点,在竞争信道的初始阶段,哪个节点先竞争到信道,就被选为代表性节点,并通过相关半径确定相关区域。在这个相关区域中,只有代表性节点发送数据,其他的节点不发送。文献[1]的研究成果是本文工作的基础。但文献[1]在选取代表节点时并没有考虑各个代表节点的重要性,只是将先随机竞争到信道的节点作为代表节点。而在实际的监测中有些节点是十分重要的,如在监测温度时,若某个区域只有一个节点是向阳的,其他节点都是向阴的,那么这个向阳的节点就显得十分重要,若它没有被选为代表性节点,没有将数据发送到 sink 节点,则对整个监测结果的有效性产生很大影响。所以像这种重要性节点必须被优先选为代表性节点。本文认为在选择代表性节点时,必须考虑节点的重要性,将数据差异大的,即重要性的节点优先竞争到信道,优先选择为代表性节点,发送数据到 sink 节点,从而保证数据整体有效性。基于此,本文提出了一种新的基于节点重要性和空间相关性的 MAC 协议(NISC-MAC),即在去除空间相关性的同时,将重要性的节点选为代表节点。这就是本文要完成的主要工作。

1 问题的描述

1.1 问题的提出

假设有一个随机部署的稠密无线传感器网络应用,它监测森林里某个区域的温度。在这个区域中随机部署 50 个节点,其拓扑图如图 1 所示。

在图 1 中假设空心节点 $n0$ 、 $n10$ 、 $n13$ 、 $n41$ 、 $n44$ 是向阳的,而其他节点都向阴。针对这样一个网络应用,认为这五个节点是很重要的,称之为重要性节点。它们对整个监测数据的影响比较大,应该被选择为代表性节点,让其能优先竞争到信道,发送数据到 sink 节点。这样才能更好地确保数据整体的有效性,使接收到的数据能更好地反映整个监测状况。本文将在后面提出一种方案来实现这个思想,确保图 1 中的这五个重要性节点被选为代表性节点。

1.2 节点重要性的定义

假设有一个随机部署的稠密无线传感器网络应用,它监测某个区域的物理特性。节点之间采集到的数据有一定的相关性,通过计算出两个数据流的欧氏距离来表示两个数据流之间的相关性,欧氏距离的大小代表了两个数据流之间的相关性;欧氏距离大的相关性小。而节点采集到的数据与相关区域的其他节点的差异大,则相应的欧氏距离也大。这些差异大的节点,被认为对整个数据的影响会很大,相对而言更重要些。为了描述这些节点的重要性,引入节点重要性的定义。将网络中节点 i 的重要性 K 定义为

$$K(i) = d_{is} = \sqrt{\sum (S_i - \bar{S})^2}$$

其中: d_{is} 表示节点 i 采集到的数据流 S_i 与节点 i 所在的相关区域中节点采集到的数据流均值 \bar{S} 之间的欧氏距离。相关性小

的,即差别大的节点的 K 值大,也就是重要性高。 K 值代表了节点的重要性。

2 NISC-MAC 协议

上章提出了节点重要性的概念,本章在此基础上结合文献[1]中的节点选择算法(INS),提出一种将节点重要性与空间相关性结合起来的 MAC 协议(node import and spatial correlation-based MAC)。INS 算法目标是找出代表节点个数,形成 Voronoi 分割。Voronoi 分割将整块区域分成很多小区域,定义这些小区域为相关区域。在相关区域内只有代表性节点发送消息到 sink 节点,其他节点不传输信息。Voronoi 分解区域的平均半径定义为相关半径,记做 r_{corr} 。相关区域内的两个节点的距离小于 r_{corr} 时,则为相关邻居。相关邻居采集的数据具有很强的空间相关性。NISC-MAC 协议通过 INS 算法选择代表性节点的个数,去除了节点的空间相关性,同时使用重要性节点筛选策略把重要性节点选为代表性节点,确保数据整体有效性。下面将具体描述这个协议。

2.1 重要性节点筛选策略

为了使重要性的节点优先竞争到信道,优先选为代表性节点,设计一个权值函数。使用阶梯函数 $f(K)$ 将重要性映射到一个整数权值,如图 2 所示。

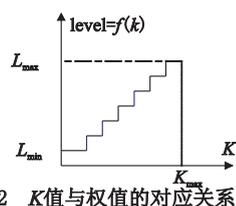


图1 节点拓扑图

图2 K 值与权值的对应关系

当重要性 K 高于 K_{max} 时,其权值为 L_{max} ,处于较小的某一区间的权值均为 L_{min} 。每级的差值与 L_{min} 均为 1。这样 K 值大的权值就大,将优先竞争到信道,相关性很近的其权值是一样的,竞争信道的概率也是一样的,这样就可以最大限度地去除节点数据的空间相关性。

节点的权值决定了该节点需发送监测数据的概率,使用一个截断的、渐增几何分布函数来表示两者之间的关系:

$$P_l = \begin{cases} 0 & l = 0 \\ ((1 - \alpha) \times \alpha^{L_{max}}) / (1 - \alpha^{L_{max}}) \times \alpha^{-l} & l = 1, \dots, L_{max} - 1 \\ 1 & l = L_{max} \end{cases}$$

其中: l 是节点的权值, $0 < \alpha < 1$ 为分布参数,在 α 的取值范围内,概率 P_l 随 l 呈指数增长。因此,权值大的节点有较高的传输概率,从而能优先的竞争到信道,选为代表性节点。当某个节点发现它无须发送数据,就进入睡眠状态以降低能耗,其函数关系如图 3 所示。

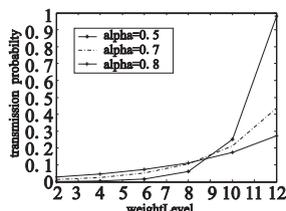


图3 在 $[1, L_{max}-1]$ 范围内发送概率分布

2.2 冲突避免策略

通常在基于竞争模式的 MAC 协议中,各节点都是平等的

竞争信道,各节点发送数据的概率都一样。在基于窗口的竞争协议中,所有节点会在 $[0, CW - 1]$ 中随机挑选一个竞争时隙传输。若两个或多个节点随机挑选到同一个时隙,就会造成冲突。为了避免冲突,它们通过调整 CW 大小来重新选择时隙。在二进制指数退避算法中,随机退避时间按以下公式计算:

$$\text{退避时间} = \text{int}(CW * \text{random}()) \times \text{slot_time}$$

其中: int 是取整函数; CW 是指数竞争窗口参数,取值为 $CW_{\min} \sim CW_{\max}$,在初始化时, CW 值为 CW_{\max} 。当要发生重传时, CW 按指数级别逐次增大,直到最大值 CW_{\max} 为止。当 CW 达到 CW_{\max} 时,它不再变化,尽管这时会发生较多的冲突。各节点在传输成功后,其 CW 值恢复到初始值 CW_{\min} 。 $\text{Random}()$ 是产生 $(0, 1)$ 之间的一个随机数; slot_time 是一个时槽时间,包括发射启动时间、媒体传播时延、检测信道的相应时间等。

本文希望在确保数据一定失真度的情况下,节点在争用信道时,优先级高的节点拥有媒体接入的优先权。当 CW 越小,节点退避的时间就越短,接入的机会更大。为了让不同的节点获取信道的概率不同,建立了一个发送概率与退避窗口的函数关系。发送概率最高的节点,其初始窗口为 CW_{\min} ,而其他节点 i 的初始窗口为

$$CW_{\min}(i) = 2^{1 - P_i} \times CW_{\min}$$

其中: P_i 为节点 i 的发送概率。

那么在新的二进制退避算法中,随机退避时间按以下公式计算:

$$\text{退避时间} = \text{int}(CW_{\min}(i) \times \text{random}()) \times \text{slot_time}$$

这样发送概率高的节点的初始窗口将较小,在退避时,退避时间短,能优先于竞争到信道。

2.3 NISC-MAC 协议的包结构

把节点的优先级信息和空间相关性信息封装在数据包内,在 RTS/CTS/DATA 预留的空间内划出 1 bit 作为 KIND 域,另外划出 32 bit 用来作为 PRI 域(发送概率域)。KIND 域帮助传感器节点区分数据包的类别,并依此来判定数据包是原始数据包还是要路由的包,节点据此来执行源发送操作还是路由转发操作;源发送操作就是节点发送自己产生的原始数据包,路由转发操作就是转发其他节点的路由包。PRI 域保存了节点的发送概率数值,用来表示节点的发送概率大小,并以此来选定代表性节点。

节点在采集事件信息时,设置自己的 RTS、CTS 和 DATA 包的 KIND 域为 0,说明这是节点的原始数据包。当某节点侦听到某个 RTS 包中的 KIND 域为 0 时,它就认为这是一个原始数据包。接收这个 RTS 包的节点将 CTS 包的 KIND 域设为 0,并发送回源节点。这样,数据的发送者和接收者的邻居都知道了需要发送的 DATA 包的类型。它们的某个邻居节点收到 DATA 包时,将其 KIND 域设置为 1,显示此包以后为过路数据包。此节点转发这个路由数据包到下一跳的节点。而其他节点接收到 DATA 包时,它检查其 KIND 域,若 KIND 域为 1 则执行路由转发操作,此时若节点有源发送操作,则抑制源发送操作,先执行路由转发操作。

在最初竞争信道时,节点发送 RTS 包,相关区域的邻居节点侦听到这个数据包,取出 RTS 包中的 PRI 域,并与自己的比较大小,若自己的小,则放弃竞争信道,这样 PRI 大的节点将优先竞争到信道,并通过相关半径确定相关区域。图 4 为 RTS/

CTS/DATA 包的结构图。

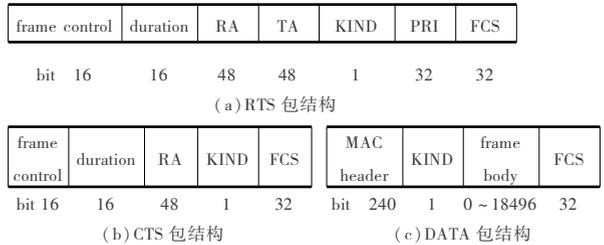


图 4 RTS/CTS/DATA 包结构图

2.4 NISC-MAC 协议的思想

NISC-MAC 协议的核心思想是:通过 INS 算法确定代表性节点的数量,去除节点数据的空间相关性;同时把重要性的节点设置高的优先级,使其发送数据的概率大,从而更易竞争到信道,优先被选为代表性节点,发送数据到 sink 节点,确保整个监测数据的有效性。在竞争时,本协议采用了本文定义的二进制退避算法。

在网络初始化的过程中,先传输很短一段时间 t (这个时间可根据具体的实验选定)的数据到 sink 节点, sink 节点取每个节点的一个数据流进行分析,计算出 K 值;然后通过预置或定期广播通知的方式将 K 值传播到监测区域内的所有节点。节点通过接收到的 K 值计算出自己的优先级、 P_i 和 $CW_{\min}(i)$;同时运行 INS 算法计算出相关半径并广播给各个节点;然后节点开始竞争信道。所有事件节点使用 RTS/CTS/DATA/ACK 第一次竞争信道,节点发送 RTS 包,其相关邻居节点监听到这个包,取出包中的 PRI 域,与自己的比较。若比自己的大,则放弃竞争信道;否则继续竞争。竞争过程中将运行本文定义的二进制退避算法。

在这个最初的竞争阶段之后,竞争到信道的节点 i 根据相关半径形成相关区域,节点 i 继续发送信息到 sink 节点,作为相关区域的惟一代表。当消息在发送时,节点 r_{cor} 根据听到的信息计算出它到 i 的距离 $d(i, j)$ 。如果 $d(i, j)$ 小于 r_{cor} ,则 j 为 i 的相关邻居节点。如果大于 r_{cor} 并且有包发送,则竞争信道。

相关区域确定后,代表性节点发送数据,为了节省能量,其他节点进入睡眠状态(SS)。在 SS 的传输期间,相关邻居节点进入睡眠状态;然而,为了能够转发路由的数据包和维持网络的连通性,在一个随机睡眠间隔时间 T 后,相关邻居节点开始监听信道。当一个相关邻居节点收到一个关于路由的 RTS 包,它从 SS 状态转到接收状态并接收数据包再转发。若代表性节点接到一个数据包,则查看其 KIND 域,若其值为 1 则优先路由转发这个数据包,抑制源发送操作。在 SS 之后,节点再进入网络初始化过程,重复整个过程。

3 仿真实验

本章利用仿真实验和分析的方法对本文提出的 NISC-MAC 协议进行性能分析,并与 IEEE 802. 11、S-MAC 和 CC-MAC 协议进行了性能的比较分析。

笔者选择国际上流行的无线传感器网络仿真软件 OMNET + +^[11] 来模拟本协议。在 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的区域内随机部署了 50 个节点,并将其中一个节点设置为 sink 节点,其位置坐标设为 $(199, 0)$ 。通过改变节点采集和发送数据的周期,从而产生不同的网络负载,来验证分析 NISC-MAC 协议的性

能,仿真时间为 600 s。主要考察协议的两个性能指标:

a) 平均能耗。每个节点的平均能耗,单位为毫焦耳(10^{-3} J)。

b) 媒体接入延时。从发送节点将数据包交给 MAC 层到下一跳接收节点收到数据包的平均时间差。这个性能参数在基于竞争的 MAC 协议中主要用来衡量竞争时延。

仿真实验初始化的主要参数配置如表 1 所示。仿真实验结果分析如图 5 所示。

表 1 实验参数

参数名	数值
接收能量消耗	14 mW
发送能量消耗	25 mW
睡眠能量消耗	0.05 mW
空闲能量消耗	0.1 mW
区域大小	200 m×200 m
节点个数	50

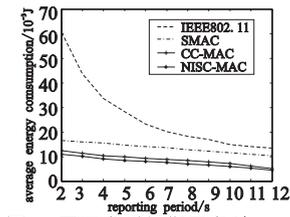


图 5 不同发送周期下各种 MAC 协议的平均能量消耗

图 5 描述了四种 MAC 协议在不同网络负载情况下的平均能量消耗。从中可以看出,NISC-MAC 协议的平均能耗略小于 CC-MAC,这是因为 NISC-MAC 协议在节点竞争媒体时,给节点设置了优先级,各节点有不同的发送概率,减少了相关区域的节点的竞争;同时当节点在退避状态时,NISC-MAC 协议每个节点的初始化窗口不一样,从而各个节点的退避时间不一样,减少了节点发送冲突的可能。与其他的两个协议相比,NISC-MAC 显著地节约了大量的能量,这是因为它利用了空间相关性,大大地减少了数据的发送量。

图 6 描述了四种 MAC 协议在不同网络负载的情况下媒体访问延时。从中可以看出,四种 MAC 协议的延时时间都很小。NISC-MAC 的延时略小于 CC-MAC,这是因为 NISC-MAC 协议相关区域的节点竞争减少。

本文用采集到的原始数据在文献[1]和本文方案下接收到的数据作一个比较。为了进行更好的比较,引入以下方差概念:

$$D(S) = E[(S_i - E(S))^2] \quad (i=1,2)$$

其中: $D(S)$ 为方差; S_i 代表两种方案收到的数据; S 代表所有节点采集的原始数据。本数值实验中, S 的原始数据是 50 个节点采集到的数据, S_i 的数据是两种方案下选择不同个数的代表节点分别采集到的数据。 $i=1$ 代表文献[1]中的方案, $i=2$ 代表本文方案。方差的大小代表 S_i 与 $E(S)$ 的偏离值。偏离值越大,说明 S_i 与 S 的差异越大。理论上将重要性节点,即数据差异大的节点选为代表性节点,那么收到的数据的方差比随机选择的要大,可以用这个方差来衡量重要性节点是否被选择。数值模拟实验结果如图 7 所示。

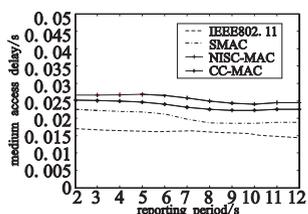


图 6 不同发送周期下各种 MAC 协议的媒体访问延时

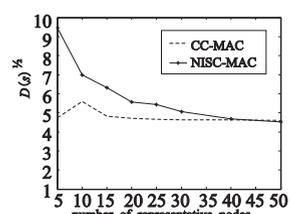


图 7 代表性节点的个数与 $D(S)$ (均方差)的关系

图 7 中,横坐标为选择的代表性节点个数,纵坐标为 $D(S)$ 。从图 7 中看出,在选择的代表性节点少于 30 个时,NISC-MAC 协议的 $D(S)$ 明显大于 CC-MAC。这是因为,NISC-MAC 协议将大部分重要性节点选择为代表性节点,而

CC-MAC 协议是随机选择的,只随机地选到了小部分或没有选到重要性节点。这说明,本文方案将重要性节点优先选择为代表性节点,让重要性数据发送到了 sink 节点,确保了数据的整体有效性,与笔者的理论分析是一致的。

4 结束语

节点数量众多且分布稠密的传感器网络产生的数据中存在着很强的空间相关性。基于空间相关性的 MAC 协议能减轻网络中数据传输量和减轻网络冲突,从而达到节省能量的目的;同时将一些重要性节点优先选择为代表性节点,将数据发送到 sink 节点,能够确保监测数据的整体有效性。本文将空间相关性 with 节点重要性结合起来,提出了一个新的基于节点重要性和空间相关性的 MAC 协议(NISC-MAC)。仿真实验表明,NISC-MAC 协议在延时不大的情况下,不仅大大地节省了网络的能量,而且确保了监测数据的整体有效性,使监测的数据更能反映出实际的物理现象。

下一步将研究相关性区域的重要性,在重要的相关区域中选择 k 个代表性节点,根据具体的应用要求来确定 k 值。

参考文献:

- [1] VURAN M C, AKYILDIZ I F. Spatial correlation based collaborative medium access control in wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2006, 14(2): 316-329.
- [2] 蹇强,龚正虎,朱培栋,等. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展 [J]. *软件学报*, 2008, 19(2): 389-403.
- [3] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 59-88.
- [4] JAMIESON K, BALAKRISHNAN H, TAY Y. Sift: a MAC protocol for event-driven wireless sensor networks, LCS-TR-894 [R]. [S. l.]: MIT, 2003.
- [5] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Networking*, 2004, 12(3): 493-506.
- [6] DAM T van, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C] // Proc of Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 171-180.
- [7] RAJENDRAN V, OBRACZKA K, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks [C] // Proc of the 1st ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 181-192.
- [8] CARLEY TW, BA MA, BARUA R, et al. Contention-free periodic message scheduler medium access control in wireless sensor/actuator networks [C] // Proc of the 24th IEEE Real-time Systems Symposium. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 298-307.
- [9] ZHOU Xi, XUE Guang-tao, QIAN C, et al. Efficient data suppression for wireless sensor networks [C] // Proc of the 14th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 599-606.
- [10] ZOGH M R, KAHAEI M H. Sensor selection for target tracking in WSN using modified INS algorithm [C] // Proc of the 3rd Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008: 1-6.
- [11] 石为人,黄河,鲜晓东,等. OMNET++ 与 NS2 在无线传感器网络仿真中的比较研究 [J]. *计算机科学*, 2008, 35(10): 53-57.