

一种适用于唤醒机制的异构传感器网络节点协同唤醒路由算法

刘文红¹, 张宏科¹, 陶 丹²

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京邮电大学计算机学院, 北京 100876)

摘 要: 基于定向扩散算法, 本文提出一种适用于唤醒机制的异构传感器网络节点协同唤醒路由算法 (CWR, Cooperative Wake-up Routing), 就近选取低能耗节点代替高能耗节点进行多级扩散, 增加路由替换和路由修补两个步骤建立低能耗节点到相应高能耗节点的路由信息, 为异构传感器网络中唤醒实现提供必要的网络拓扑基础. 仿真实验表明本文算法在支持唤醒机制实现过程中的节能特性.

关键词: 异构传感器网络; 协作唤醒路由; 定向扩散; CWR 算法

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 07-1341-06

A Novel Cooperative Wake-up Routing Algorithm for Wake-up Mechanism in Heterogeneous Sensor Networks

LIU Wen-hong, ZHANG Hong-ke, TAO Dan

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Computer Science and Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on directional diffusion algorithm, this paper proposes a novel cooperative wake-up routing algorithm (CWR algorithm) for wake-up mechanism in heterogeneous sensor networks. We substitute a high-cost node with the nearest low-cost node, which launches multi-hop diffusion. In particular, we add two steps: routing displacement and routing repair to establish network topology between low-cost nodes and their corresponding high-cost nodes, thus provide a necessary network topology foundation for wake-up mechanism. Simulation results demonstrate that our CWR algorithm is energy-efficient during wake-up process.

Key words: heterogeneous sensor networks; cooperative wake-up routing; directional diffusion; CWR algorithm

1 引言

异构传感器网络研究中一个热点问题就是异构节点如何能量有效地实现对外环境的协同监测. 一种常用节能方法: 让无需工作的传感器节点处于低能耗的休眠状态, 在需要时对其进行唤醒, 即通常所谓的“唤醒机制”^[1]. 早期唤醒机制研究主要集中于能量有效的 MAC 协议^[2~4], 这方面研究属于传感器网络协议底层性研究, 针对传感器网络节能需求采用周期性“侦听/睡眠”的无线信道使用策略. 该领域研究日趋成熟, 提出的主要 MAC 协议包括 S-MAC、T-MAC、SMACAS、EAR 等. 随着研究的不断深入, 唤醒问题研究的重心逐步转移到与网络覆盖及拓扑密切相关的唤醒调度策略上来. 唤醒调度策略的研究可分为如下三类: 一是在平面结构的同构传感器网络中^[5,6], 将高密度冗余部署的传感器节点划分为若干互补相交的节点集合, 各个传感器节点集合都能

维持监测区域的原始覆盖质量, 通过唤醒轮换每个节点集合的工作时间. 这是唤醒机制一种最为简单的表现形式, 是以传感器节点高密度冗余部署为代价换得网络工作寿命的延长. 二是在分层结构的能量异构传感器网络中^[7,8], 高能量簇头节点负责唤醒本簇其他低能量节点, 以实现整个簇内部从休眠状态到工作状态的转换. 这些文献仅从节点能量的异构角度讨论异构传感器网络中唤醒问题. 三是在对运动目标跟踪监测应用中唤醒问题的研究^[9,10], 根据移动目标运动轨迹变化对周边的多传感器节点实施唤醒, 以获得移动目标的即时详细信息. 然而, 现有的传感器网络中唤醒问题的各种研究并没有充分考虑节点传感类型、传感及通信能力方面的异构特征, 而这些显著特点理应赋予唤醒机制更为丰富的表现形式和内涵, 成为异构传感器网络系统的重要技术特征之一.

支持唤醒机制的异构传感器网络与其他传感器网

络在 workflow 等方面存在不小的差异,这些差异直接影响了异构传感器网络拓扑的建立方式,迫切需要新的方法予以解决.本文对经典的定向扩散算法^[11]进行改进,设计了一种异构传感器网络节点协同唤醒路由算法(Cooperative Wake-up Routing),以指导建立异构传感器节点间路由,为异构传感器网络中唤醒实现提供必要的网络拓扑基础.

2 工作前提

异构传感器节点按照感知媒体类型可分为以下两种:(1)低能耗节点:资源有限,能耗较低,适合对环境中的单一数值的媒体信息(温度、湿度等)实施长期监测;(2)高能耗节点:资源丰富,能耗较高,适合于环境中信息量丰富的媒体信息(音/视频信息)对区域突发事件的即时监测.

异构传感器网络与其他传感器网络间最显著的差异就是异构传感器节点间的协同监测.有别于传统的簇头节点唤醒簇内节点的模式,异构传感器网络中节点唤醒流程为:低能耗节点一直处于工作状态,对环境进行实时监测,一旦监测到异常事件时,该低能耗节点唤醒周边的高能耗节点,一起参与对该异常事件的协同监测.由此可见,发现异常事件的低能耗节点通过“吵醒”附近的高能耗节点实现异构传感器节点间的协同监测,不仅可以节约网络能量,延长网络工作寿命;也可实现网络对环境的智能感知和快速响应.

表 1 符号

符号	含 义
$R_S / R_{SH} / R_{SL}$	节点/高能耗节点/低能耗节点的传感半径
$R_C / R_{CH} / R_{CL}$	节点/高能耗节点/低能耗节点的通信半径
N_H / N_L	所需部署的高/低能耗节点数目
S	监测区域面积
p_H / p_L	高/低能耗节点的网络覆盖率

表 1 定义了后面推导涉及到的一些符号.本文假设同类传感器节点满足 $R_C = 2R_S$;并假设网络中各节点均满足全向传感/通信模型.

高/低能耗节点的能力差异决定了高能耗节点的通信半径和传感半径远大于低能耗节点,如图 1 所示.因此,在满足一定覆盖完整性的前提下,高能耗节点的传感区域内将有多个低能耗节点,且这些低能耗节点大都不能直接与该高能耗节点通信.建立起一个高能耗节点传感

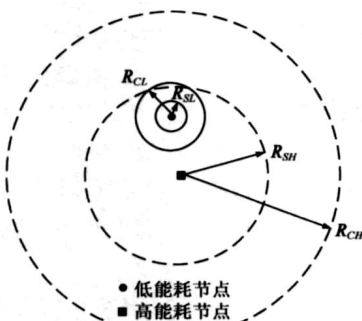


图 1 传感器节点传感/通信模型

范围内低能耗节点到达其的路由信息,这是实现低能耗节点对高能耗节点唤醒的关键问题所在.

异构传感器节点部署是保证网络正常有效工作的一个首要环节.考虑到低/高能耗节点传感能力以及硬件成本差异悬殊,本文采用大量低能耗节点随机部署.而对于少量高能耗节点,我们采用 Grid 部署策略,保证每个高能耗节点与邻近多个同类节点存在一定感知冗余.部署策略保证监测区域内的低能耗节点至少被一个高能耗传感器节点覆盖.当低能耗节点监测到异常事件时,总能找到一个高能耗节点进行唤醒,以实现异常区域的协同监测.

3 协同唤醒路由算法

本节主要解决的问题是如何建立起一个高能耗节点传感范围内低能耗节点到达其的路由信息,为唤醒机制实现提供必要的网络拓扑基础.

与他人研究工作相比,我们不仅考虑到异构节点间通信半径差异,还考虑了另一个被忽略的重要参数:异构节点间传感半径差异.我们把问题抽象为在一个以高能耗节点为簇头,其感知区域内多低能耗节点为簇内成员节点的簇结构中,建立成员节点到簇头路由信息的问题.在同构传感器网络中,广泛采用多级扩散建立簇内节点间的路由信息^[1].多级扩散过程逐步建立扩散源点周围节点到其的路由信息.然而,异构传感器网络中节点的异构性限制了定向扩散算法在网络拓扑建立中的直接使用,存在以下两层原因:

(1) 扩散源点的确定:在异构传感器网络中,高能耗节点的通信半径一般取值较大,通过一级扩散就可以向其通信区域内所有低能耗节点广播.这样就决定了不可能以高能耗节点作为扩散源点.

本文选取与高能耗节点距离最近的一个低能耗节点,以此代替该高能耗节点进行多级消息扩散,从而将异构传感器网络中低能耗节点到就近高能耗节点的路由信息建立问题转化为一个同构传感器网络中的路由问题.具体方法为:高能耗节点以其通信半径进行消息广播,收到消息的所有低能耗节点发回应答消息 ACK,高能耗节点选取最快返回 ACK 响应的低能耗节点作为扩散源点,进行多级消息扩散.

(2) 扩散级数的确定:在扩散源点确定以后,扩散级数的大小也会直接影响到网络拓扑建立阶段的能量消耗的程度,成为决定本文路由算法有效与否的一个重要因素.若扩散级数偏大,就会建立高能耗节点传感区域外的部分低能耗节点到其的路由,而它们并不具备唤醒高能耗节点的资格.若扩散级数偏小,又无法为高能耗节点传感区域内的部分低能耗节点建立到其的路由,使得这些节点无从实施唤醒(如图 1).

在此,我们设计了计算扩散级数 n 的方法,以此优化控制替代低能耗节点消息扩散的规模,不仅节约网络能耗,还可有效区别该高能耗节点传感区域内和非传感区域的低能耗节点. 计算公式见式(1):

$$n = \text{Round}(R_{SH}/R_{CL} + 1) \quad (1)$$

其中 R_{SH}/R_{CL} 容易理解,是以某个低能耗节点为源点,以其通信半径为步长,估算距离高能耗节点最远距离(R_{SH})至少需要的扩散级数. 考虑到随机部署的低能耗节点因局部覆盖不均等因素对扩散级数的影响,我们增加修正系数以调整. 详细实验数据及分析结论见 4.1 节.

CWR 算法示意图见图 2. CWR 算法描述如下:

Step1: 高能耗节点以其通信半径 R_{CH} 广播消息;

Step2: 收到消息的所有低能耗节点发回 ACK, 高能耗节点选取最快返回 ACK 响应的低能耗节点作为扩散源点;

Step3: 扩散源点以其通信半径 R_{CL} 作 n 级扩散, 经由的各低能耗节点建立反向路由信息;

Step4: 若低能耗节点列表中“下一跳节点 ID”为扩散源点 ID, 则替换为高能耗节点 ID;

Step5: 检验 Step4 中进行路由替换的低能耗节点是否通信可达高能耗节点. 若是, 转至 Step6; 否则, 进行路由修补, 将“下一跳节点 ID”取值重新修改为扩散源点 ID, 再增加扩散源点至高能耗节点的一跳路由信息;

Step6: 以数据传输延迟作为梯度变量, 为低能耗节点生成加强唤醒路径.

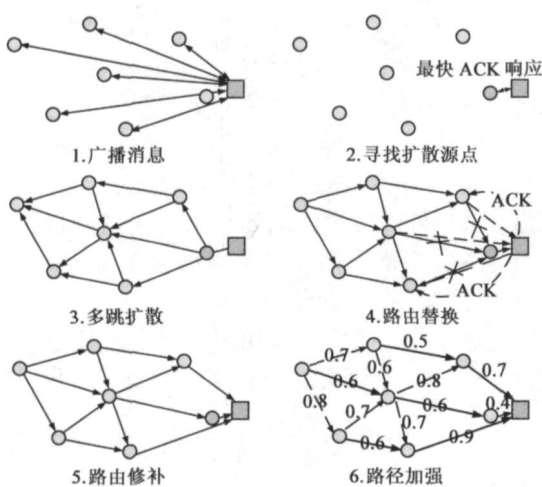


图 2 CWR 算法示意图

CWR 算法中 Step1 和 Step2 使得经典的定向扩散算法可应用于异构传感器网络唤醒机制的实现. 选择最近低能耗节点代替高能耗节点作多级扩散, 直观建立其他低能耗节点到扩散源点的拓扑信息(Step3). 引入 Step4 和 Step5 两步, 一方面有效降低扩散源点因频繁转发其他低能耗节点数据而造成能量过度消耗, 避免出现覆盖“黑洞”; 另一方面也减少其他低能耗节点至高

能耗节点的通信跳数, 进而节约网络能量.

需要说明的是, 由于网络中高能耗节点的冗余部署, 可能会存在一个低能耗节点 a 被两个(或多个)高能耗节点 A, B 同时感知覆盖的情况, 如图 3(a). 这时, 算法会参照梯度变量值(本文选取数据传输延迟)为低能耗节点 a 建立一条最优加强唤醒路径. 图 3(a) 中, 低能耗节点 a 到达高能耗节点 A 的数据传输延迟 $1.1 (= 0.6 + 0.5)$ 显然少于到达高能耗节点 B 的数据传输延迟 $1.9 (= 0.7 + 0.6 + 0.6)$, 加强唤醒路径建立如图实线箭头标示.

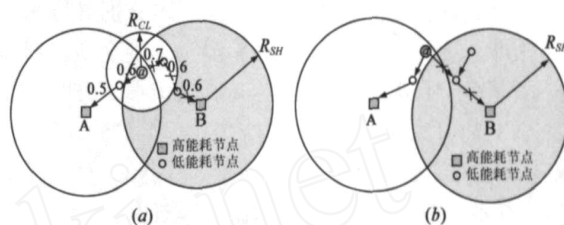


图 3 加强唤醒路径示意图

另外, CWR 算法中为有效区别高能耗节点传感区域内的低能耗节点, 采用限定消息扩散级数的方法. 但由于消息扩散方向的随机性, 势必会造成一定误判. 如图 3(b), CWR 算法为原本不在高能耗节点 B 的传感区域内的低能耗节点 a 建立了到其的加强唤醒路径. 这条加强唤醒路径显然是无效的. 由于我们采用高能耗节点冗余部署策略, 其始终满足覆盖完整性和通信连通性, 在高能耗节点 B 传感区域外延总会存在另一个高能耗节点 A 感知低能耗节点 a 所处的区域, 并建立一条有效的加强唤醒路径. 我们通过计算低能耗节点 a 与高能耗节点 A, B 的数据传输延迟的方法, 近似地认为到某个高能耗节点的数据传输延迟越小, 低能耗节点 a 存在于其感知区域的可能性就越大, 以此尽可能地判别并删除无效路径.

4 仿真实验与分析

我们用 C++ 语言设计了一个仿真程序评估算法性能.

4.1 最优扩散级数

为了测试本文设计的扩散级数计算方法效率, 我们首先建立测试模型并定义两个性能指标判全率 (Recall) 和判准率 (Precision). 见表 2.

表 2 测试模型参数

	高能耗节点传感区域内低能耗节点数目	高能耗节点传感区域外低能耗节点数目
收到扩散消息的低能耗节点数目	A	B
未收到扩散消息的低能耗节点数目	C	D

判全率 (Recall) = $A / (A + C) * 100\%$

判准率 (Precision) = $A / (A + B) * 100\%$

判全率反映了高能耗节点传感区域内能够建立到其路由的低能耗节点的比率, 判准率则反映了高能耗节点传感区域外建立到其路由的低能耗节点的程度. 这两个性能指标是相互制约的关系. 判全率取值增大时, 判准率很难保证; 反之亦然. 因此, 在确定扩散级数时, 我们需要折衷判全率和判准率这两个性能指标. 其中, 判全率要优先予以保证.

在测试模型中, 考虑到实例的代表性, 我们选取了 7 组典型数据 (R_{SH}/R_{CL} 不同) 对 1、2、3 跳分别进行了大量的仿真实验. 图 4(a) 和图 4(b) 显示了判全率和判准率两个指标对 R_{SH}/R_{CL} 分别为 150/120 ($=1.25$), 150/100 ($=1.5$), 150/90 ($=1.67$), 150/80 ($=1.875$), 扩散级数 n 取值为 2 的性能评价. 在图 4(a) 中, 我们可以看到: 当扩散级数 n 不变时, 随 R_{SH}/R_{CL} 取值的增大, 判全率呈下降趋势. 当 $R_{SH}/R_{CL} = 1.875$ 时, 部分判全率取值下降显著. 这时就需利用修正系数调整扩散级数的计算公式, 以保证获得较高的判全率. 图 4(b) 中, 我们发现: 当扩散级数 n 不变时, 随 R_{SH}/R_{CL} 取值的增大, 判准率则明显呈上升趋势. 实验中, 当 R_{SH} 固定不变时, R_{CL} 的减小使得各级扩散的规模得到有效的控制, 呈现以扩散源点为中心的均匀放射性扩散, 因此误判情况减少, 进而判准率增大.

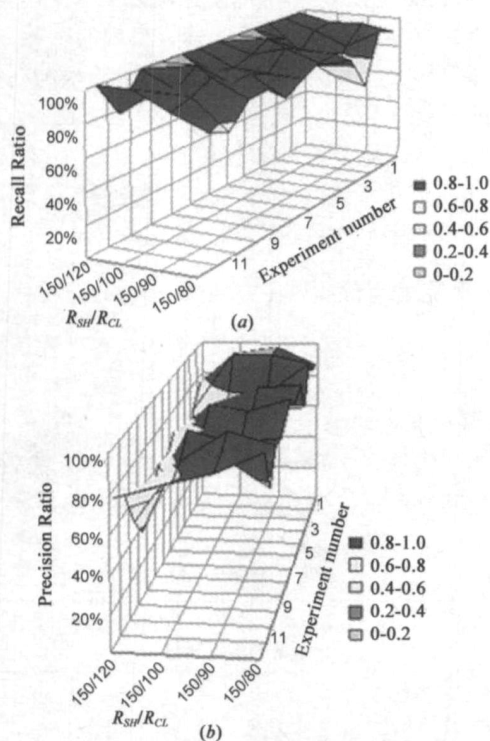


图 4 判全率/判准率与影响扩散级数的 R_{SH}/R_{CL} 间关系

本实验的关键问题在于如何选取修正参数 以获

得优化的扩散级数. 本实验采用穷举法进行一系列实验, 并以判全率和判准率作为衡量标准. 对图 5 中的两个实例进行分析, 具体说明修正参数 的选择依据. 图 5(a) 是 R_{SH}/R_{CL} 取值为 150/120 ($=1.25$) 时的情况. 即使 $n=2$ 时的判准率 75.1% 远不如 $n=1$ 时的 99.2%. 出于对判全率的优先考虑, 我们调整修正系数 获得扩散级数 $n=2$. 图 5(b) 是 R_{SH}/R_{CL} 取值为 150/70 ($=2.14$) 时的情况. 尽管 $n=2$ 时的判准率 (99.6%) 取值相当高, 但此时的判全率取值 66.1% 过低. 理由如前述, 我们对修正系数 加以调整获得扩散级数 $n=3$. 通过对大量仿真试验结果的分析, 以及对判全率和判准率这两个性能指标的折衷, 本实验中修正参数 的经验取值为 0.36.

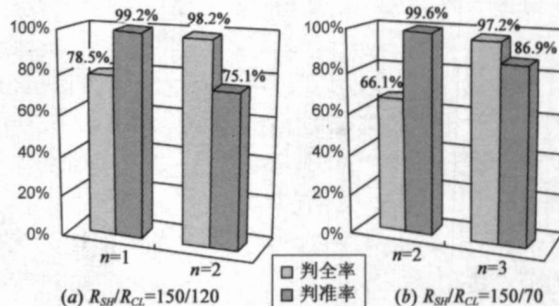


图 5 修正系数 η 对扩散级数的影响

图 6 显示了各组实验中判全率和判准率的平均值. 实验结果中判全率和判准率两项性能指标取值较高: 7 组实验中的判全率取值在 84.30% 至 98.15% 之间; 同样, 判准率取值最高为 97.2%, 最低也达到了 75.1%. 说明本文扩散级数计算方法的有效性. 在实验中, 判全率指标优先考虑, 力争涵盖高能耗节点传感区域内的尽可能多的低能耗节点. 而对判准率的要求相对低些. 影响判准率的主要因素是来自于对高能耗节点传感区域以外的边沿低能耗节点的误判. 但是, 考虑到异构传感器网络中高能耗节点的冗余部署策略, 这些误判的低能耗节点必然会被其他一个或多个高能耗节点所覆盖. 因而, 必然可以找到一个高能耗节点进行唤醒, 从整体性能上不足以对唤醒实现造成很大影响.



图 6 判全率/判准率均值

4.2 能量消耗影响

本小节通过一系列仿真实验对 CWR 算法中增加 Step4 和 Step5 前后性能进行了分析说明. 实验选取具有代表性的 1、2、3 跳簇进行.

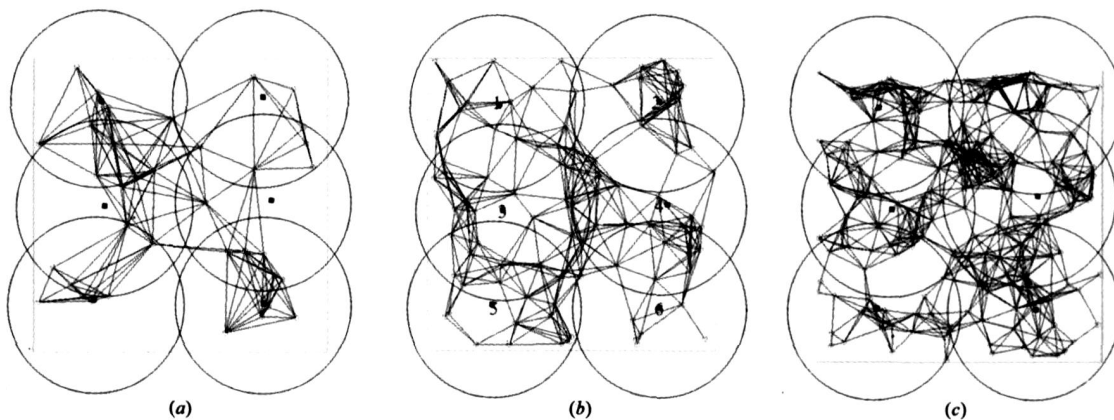


图 7 实例图. 方框为高能耗节点, 小圆圈为低能耗节点, 大圆圈表示各高能耗节点的感知区域. 三组实验的共同参数取值为 $S=500 \times 500 \text{m}^2, R_{SH}=150 \text{m}, p_H=p_L \geq 95\%$. (a) 表示 1 跳簇, 实验参数取值为 $R_{SL}=80 \text{m}, R_{CL}=160 \text{m}, N_H=6, N_L=36$; (b) 表示 2 跳簇, 实验参数取值为 $R_{SL}=50 \text{m}, R_{CL}=100 \text{m}, N_H=6, N_L=94$; (c) 表示 3 跳簇, 实验参数取值为 $R_{SL}=35 \text{m}, R_{CL}=70 \text{m}, N_H=6, N_L=193$

首先, 估算出低/高能耗节点的部署数目并在监测区域内按相应策略进行部署, 实例如图 7(a) ~ (c) 所示.

CWR 算法中增加了路由替换和路由修补两步, 旨在减少扩散源点因转发多节点数据而造成的能量过多消耗; 减少通信跳数以实现能量节约. 在此, 我们通过仿真实验比较这两步骤引入与否对整个网络能耗的影响. 实验假设高低能耗节点均满足较高的网络覆盖率 (95%), 近似看作完全覆盖. 为讨论方便, 假设网络中每一跳通信能耗为 E .

本文分别对上述三类情况进行了 50 组仿真实验, 以下仿真结果为 50 次仿真实验平均值. 对于 n 跳簇, 图 8(a) ~ (c) 中纵坐标表示簇内所有低能耗节点唤醒高能耗节点所消耗的能量值. 如图 8(a) ~ (c) 所示, 引入路由替换和路由修补两步后较之引入前明显节约能量. 随着 n 值的增加, 簇内实现唤醒的能耗也随之增大; 两个步骤引入前后的绝对能量差相当可观, 但节能比率呈逐渐下降趋势的. 对于 n 跳簇, 若引入前能耗为 E_{Total} , 则引入后较之引入前近似节约 $E_{\text{Total}} / (n + 1)$ 的能量.

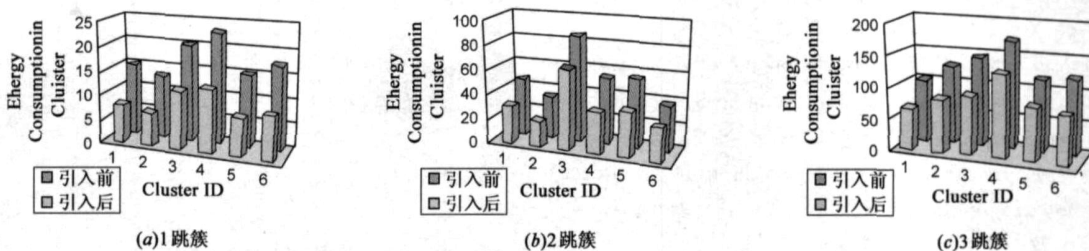


图 8 路由替换和路由修补引入前后对簇内能量消耗的影响

4.3 影响簇内节点路由修补率的因素

从算法描述容易看出, 簇内节点路由修补率 (Repair-probability) 对 CWR 算法性能具有一定影响. 当簇内节点路由修补率较大时, 在路由替换步骤需要额外消耗能量. 通过分析大量实验数据, 我们发现影响簇内节点路由修补率的参数主要有两个:

(1) 簇内节点规模 (Cluster-scale)

簇内节点规模与簇内节点路由修补率成反比. 随

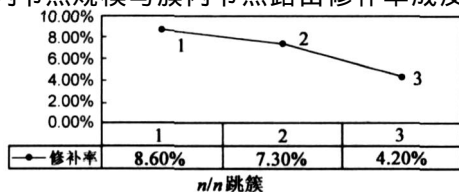


图 9 簇内节点规模与簇内节点路由修补率间关系

着簇内节点规模的增大, 在高能耗节点就近找到一个扩散源点的概率不断增大, 经路由替换后需进行路由修补的节点数目降低. 因此, 簇内节点路由修补率随之下降. 如图 9 可见, 3 跳簇的簇内节点路由修补率为 4.2%, 仅为 1 跳簇的簇内节点路由修补率的一半不到.

(2) 扩散源点与高能耗节点间距离 (Distance)

该参数与簇内节点路由修补率成正比例关系. 扩散源点与高能耗节点间距离越小, 原本通过一跳可达扩散源点的节点一跳即可达高能耗节点, 簇内节点路由修补率自然降低. 特别地, 当扩散源点与高能耗节点位置重合时, 簇内节点路由修补率取最小值零. 结合图 7(b), Cluster ID 为 3、5、6 的簇中替代低能耗节点与高能耗节点的距离较大, 反映在图 7 中相对应的簇内节点路由修补率明显高出其他簇, 最高达 13.3%. 而 Cluster ID

为4的簇中扩散源点与高能耗节点位置近乎重合,反映在图10中相对应的簇内节点路由修补率为零值。

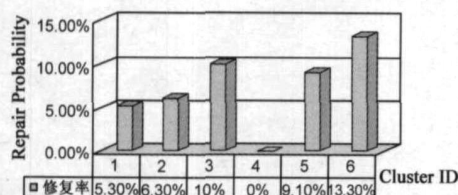


图10 扩散源点与高能耗节点间距离与簇内节点路由修补率间关系

5 结束语

唤醒机制是传感器网络能量有效地实现环境监测的重要手段之一。本文对经典的定向扩散算法进行改进,提出了一种适合于唤醒机制的异构传感器网络节点协同唤醒路由算法(CWR 算法),一系列仿真实验验证该方法的有效性。

参考文献:

- [1] I F Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam, E Cayirci. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks. 2002, 38:393 - 422.
- [2] W Ye, J Heidemann, D Estrin. Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. IEEE Transaction on Networking, 2004, 12(3): 493 - 506.
- [3] T van Dam, K Langendoen. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks[A]. In Proc of SenSys[C]. New York, USA: ACM Press, 2003. 65 - 72.
- [4] J Polastre, J Hill, D Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks[A]. In Proc of SenSys[C]. Baltimore, Maryland, USA: ACM Press, 2004. 95 - 107.
- [5] Huadong Ma, Yonghe Liu. On coverage problems of directional sensor networks[A]. In Proc of MSN[C]. Berlin: Springer-verlag, 2005. 721 - 731.
- [6] F Ye, G Zhong, S Lu, L Zhang. Energy Efficient Robust Sensing Coverage in Large Sensor Networks, UCLA Technical Report[OL]. <http://www.cs.ucla.edu/yefan/coverage-tech-report>. Oct. 2002.
- [7] Godfrey P B, Ratajczak D. Naps: scalable, robust topology management in wireless ad-hoc networks[A]. The 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks[C]. Berkeley, USA: ACM Press, 2004. 443 - 451.
- [8] I Chatzigiannakis, A Kinalis, S Nikolettseas. Power conservation schemes for energy efficient data propagation in heterogeneous wireless sensor networks[A]. In Proc. of the 38th Annual Simulation Symposium[C]. San Diego, CA, USA: IEEE Press, 2005. 60 - 71.
- [9] Sangeeta Bhattacharya, Xing G, Lu C, Roman G-C, Chipara O, Harris B. Dynamic wake-up and topology maintenance protocols with spatiotemporal guarantees[A]. The 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks[C]. Los Angeles, CA, USA: IEEE Press, 2005. 28 - 34.
- [10] C Gui, P Mohapatra. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks[A]. In Proc of MobiCOM[C]. New York, USA: ACM Press, 2004. 129 - 143.
- [11] Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks[A]. In Proc of MobiCOM[C]. Boston, Massachusetts, USA: ACM Press, 2000. 56 - 67.

作者简介:



刘文红 女, 1967 年出生于黑龙江大庆市, 博士生. 主要研究方向为 IP 网络技术.
E-mail: liuw h@jiaxun.com

张宏科 (见本期第 1222 页).



陶丹 女, 1978 年出生于吉林省吉林市, 博士生. 主要研究领域为多媒体与传感器网络.