

# 无线传感器网络跨层自适应周期分簇路由模型

徐楠<sup>1</sup> 孙亚民<sup>1</sup> 黄波<sup>1</sup> 于继明<sup>2</sup>

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)<sup>1</sup>

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)<sup>2</sup>

**摘要** 分析了无线传感器网络传输信息位置相关性特点以及节点能耗模型,运用基于能量指标和距离指标的簇首选举方法,建立了一种基于节点剩余能量和传输距离的跨层自适应周期簇间路由性能模型。该模型均衡网络节点能耗和负载。簇间通信根据其下一跳簇节点的能量、能耗因子、RSSI 以及能耗指数等进行选择。仿真结果表明,与已有的跨层设计和分簇协议相比,该模型有效地延长了网络寿命,提高了网络的吞吐量。该模型能效高,控制开销较低,能量负载均衡。

**关键词** 无线传感器网络,跨层设计,分簇,能耗指标,能耗因子

**中图分类号** TP39 **文献标识码** A

## Cross-layer Adaptive Round Distributed Clustering Routing Model for Wireless Sensor Networks

XU Nan<sup>1</sup> SUN Ya-min<sup>1</sup> HUANG Bo<sup>1</sup> YU Ji-ming<sup>2</sup>

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)<sup>1</sup>

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The character of location-related transmission information and model of energy consumption were analyzed. A cross-layer adaptive round inter-clusters routing was proposed based on the cluster election method of the energy index and distance index. The model can balance traffic load and energy consumption of nodes. Communication of inter-clusters is based on energy and energy-consumption factor and RSSI and energy index of next hop. By comparison with other clustering and cross-layer routing protocols, the simulation results show that the model prolongs the lifetime and improves the throughput. The model is high energy-efficiency, small control overhead and well balanced energy load.

**Keywords** Wireless sensor networks, Cross-layer design, Clustering, Energy-consumption index, Energy-consumption factor

## 1 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)是由密集地部署在某一场景内或者靠近该场景的大量节点构成的,可以广泛地应用在军事和民事领域<sup>[1,2]</sup>。由于节点资源受限一直是 WSNs 的软肋,因此人们对 WSNs 的研究侧重在提高能量效率,延长网络寿命上。

Piyush Gupta<sup>[3]</sup>的研究结果表明,随着网络节点数目的增加,单个节点实际使用的带宽以  $1/\sqrt{n}$  的速度下降, $n$  是节点的总数。当节点数目增多时,通信控制开销增加速度很快。当  $n$  到达一定规模时,会用尽几乎所有的通信资源。基于分簇的思想是解决无线传感器网络管理及扩展性问题的一个重要途径。A. Goldsmith<sup>[4]</sup>等指出,协议的跨层设计对满足新兴的应用要求是必要的,特别是能量受限的资源。为了保证网络的连通性,考虑节点的能耗状态,R. Rugin<sup>[5]</sup>等人提出了一种跨层设计的路由。

针对 WSNs 的资源受限及应用特点,本文结合分簇和跨层设计的优点,设计出跨层自适应周期分簇路由(Cross-layer Adaptive round distributed Clustering Routing, CACR)。本协议采用基于地理位置的分簇方式,综合考虑节点剩余能量以及通信代价选择簇首,根据剩余能量动态调整簇首的工作周期,均衡网络节点能量,在簇首间路由路径选择上,选择能效最佳簇首作为中继节点,将中继簇首调整到最适合的发射功率,以便节省能量,从而提高网络整体能效。

## 2 相关工作

Heinzelman 等人提出的 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)协议<sup>[6]</sup>中,每个节点都可以与基站直接通信。该协议采用一个预设的节点比例来做簇首,簇首节点按照 TDMA 方式为簇内的每个节点分配一个时隙,并对所收集到的簇内数据进行必要的融合,以便减少传输给基站的数据,从而减少能耗。簇首采用随机轮询的方式,将节点能量负

到稿日期:2010-06-12 返修日期:2010-11-11 本文受国家自然科学基金(60705020),南京理工大学科研发展基金(XKF09072)资助。

徐楠(1973-),女,博士生,主要研究领域为通信与网络、无线传感器网络等,E-mail: pink\_rose1976@hotmail.com;孙亚民(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为通信与网络、无线传感器网络等;黄波(1980-),男,博士,讲师,主要研究领域为人工智能与 Petri 网、智能系统与网络通信等;于继明(1976-),男,博士,讲师,主要研究领域为通信与网络、无线传感器网络等。

载均衡地分配到各个节点。由于减少了与基站直接通信的节点数和通信量, LEACH 协议可以有效地延长网络的寿命。然而, 该协议簇首的选举忽略了节点的剩余能量、节点与基站的距离等信息, 这将导致簇首节点很快失效, 节点能耗不均匀。

文献[7]在文献[6]的基础上改进了簇首的选举, 节点根据自己当前的剩余能量和网络中所有节点的剩余之比来计算自己成为簇首的概率。剩余能量越多的节点成为簇首的机率就越大。该协议需要每个节点获得全局信息, 使得其可扩展性受到影响。

HEED<sup>[8]</sup>协议是 Younis 等人提出的一种混合式分簇协议。算法根据节点的剩余能量来概率性地选取一些候选簇首, 簇内部以通信代价高低来竞争产生最终簇首。其簇生成算法需要在簇半径内进行多次消息迭代, 由此带来的通信开销比较显著。

文献[9]提出了一种适合部署大规模节点的网络能效随机分簇算法, 并提出层次化簇结构的思想。为建立  $h$  层簇, 分别给出各级簇首形成的方法, 并计算出最小化网络系统能耗的优化参数。但该算法在选举簇首的过程中, 始终按照一个生成随机数来进行, 没有考虑节点的其他特征, 也没有考虑簇首轮换以及簇的重组问题, 使得簇首节点能量耗尽后导致网络分割, 从而影响网络的寿命。

李成法等提出了用于组织网络拓扑的能量高效的非均匀分簇 EEUC 算法<sup>[10]</sup>, 候选簇首通过使用非均匀的竞争范围来构造大小不等的簇。靠近汇点的簇的规模小于远离汇聚点的簇, 靠近汇点的簇首可以为簇间的数据转发预留能量。

Gung<sup>[11]</sup>等提出了基于拥塞控制的跨层设计。文献[12]中提出了 EOA 能量优化方法, 该方法将物理层、MAC 层以及路由层进行联合跨层优化设计。EOA 将物理层发送功率作为选择最佳能耗路由路径的标准, 使用网络层路由信息来确定 MAC 层占空比。

文献[13]中, 作者通过使用离散时间队列模型, 分析了 WSNs 中基于自适应调制编码通信的瑞利衰落的影响, 推导出包传递速率和平均时延, 通过共享 MAC 层信道波动信息来确定在不同传输环境下最佳能效的操作模式。该方法只考虑怎样延长单个传感器节点的寿命, 忽略了将网络寿命视为一个整体。文献[14]提出了将路由和 MAC 层联合考虑的跨层路由策略 XLRP, XLRP 协议分为邻居发现、兴趣传播以及数据传输 3 个阶段的操作。其路由策略基于所要路由的数据量来切换发送器功率级别。

### 3 系统模型与通信模型能耗及问题描述

#### 3.1 系统模型

传感器网络中, 节点视其所担任角色的不同分为 3 种类型, 其功能和特性描述如下: 1) 汇点 (Sink): 接收所有来自其它传感器收集的数据, 并将数据发送数据分析中心。在我们的模型中, 假定只有一个汇点位于所监视区域外部, 其能量、存储空间、通信速度以及运算速度远远大于一般传感器节点。2) 簇首节点 (cluster-head, CH): 具有感知数据的能力, 同时负责将本簇的数据转发到距离汇点比自己更近的邻居簇首。3) 普通传感器节点 (ordinary sensor node, SN): 只感知数据。其中, 簇首节点和普通传感器节点是同构的, 它们的角色会发生

相互转换。

本文假设  $N$  个节点随机均匀地分布在一个区域为  $a * a$  的内部, 并假设传感器网络具有如下性质:

(1) 汇点位于区域外部, 网络一旦部署后, 传感器节点和汇点位置不再发生改变。

(2) 传感器节点 (除汇点外) 是同构的, 即每个节点功能相同。

(3) 节点的无线发射功率可控, 即节点可以根据到信息接收方距离的远近调整发射功率, 以节省能量。例如, CC1000, CC2420 等节点具有多个发射功率等级, 与采用固定发射功率相比, 可以显著减少节点的能量消耗, 从而延长无线网络的寿命。

(4) 系统中的节点知道自己以及汇点的位置信息。对于 WSNs 的大多数应用来讲, 根据节点传送的数据进行分析判断并执行相应的决策。节点明确自己的位置, 能详细说明“在什么位置或区域发生了特定事件”, 以便于实现对所感知目标的准确定位和追踪。

#### 3.2 无线通信模型能耗

本文采用文献[7]的无线通信能量消耗模型。该模型给出了一个阈值  $d_0$  ( $d_0$  是一个常数, 它取决于所使用的环境)。根据接收方与发送方的距离  $d$ , 将无线通信能量消耗模型分为两种: 自由空间模型 (free space model) 和多径衰落 (multipath fading model) 模型。当收发节点间的距离小于  $d_0$  时, 发送方发送数据的能耗与距离的平方成正比, 采用自由空间模型。否则与距离的 4 次方成正比, 此时采用多径衰落模型。对于相距为  $d$  的节点间传输  $k$  bit 的数据, 发送端所需消耗的能量使用下面的公式计算:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec}(k) + E_{amp}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收端所需要消耗的能量为:

$$E_{Rx} = kE_{elec} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中,  $E_{elec}$  表示运行接收器或者收发器电路所消耗的能量, 它取决于这些因素: 数字编码、调制、滤波、信号的传播。 $E_{amp}$  是发送放大器所消耗的能量, 其值取决于收发节点间距离以及可接收的误码率。 $\epsilon_{fs}$ ,  $\epsilon_{mp}$  分别为这两种模型中功率放大所需的能量。从以上公式中的参数可以看出, 为了减少不必要的能耗, 在进行协议设计时, 应尽可能地减小发射距离以及每条信息收发操作的次数。本文假设所使用的无线信道是对称的, 即从节点  $x$  传送  $k$  位消息到节点  $y$  所消耗的能量等于从节点  $y$  传送  $k$  位消息到节点  $x$  所消耗的能量。

#### 3.3 相关参数与问题描述

$N$  个节点随机均匀地分布在  $a * a$  的区域, 将该区域划分为若干正方形区域  $C_{ij}$ , 每个区域各自形成一个簇, 并假定每个区域有  $m$  个节点。

簇内节点  $i$  到簇内其他节点的距离的平方和为:

$$C_{ij}^2 = \sum_{j=1}^{m-1} ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2) \quad (3)$$

式中,  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$  分别表示节点  $i$  和该簇内其它节点  $j$  的坐标。网络一旦部署好以后, 每个节点所计算出来的值就不会发生变化, 除非本簇内有新的节点进入或者有节点死亡的情况发生, 这个值才会发生改变。

第  $I$  个簇内各节点到汇点的距离平方和可以通过式(4)

计算:

$$D_{C_i}^2 = \sum_{j=1}^m ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2) \quad (4)$$

式中,  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$  分别表示节点  $i$  和汇点的坐标。由于节点一旦部署以后就不再移动, 每个簇内各节点到簇首的平方和是一个大小固定的值, 直到簇中有节点死亡或者有新节点加入, 这个值才会发生变化。

**定义 1** 簇内距离指标 ( $C_{DI}$ ) 是指簇内某一节点  $i$  到簇内其它节点的距离的平方和与簇内各节点到汇点的距离的平方和之比。若节点  $i$  当选为簇首, 这个值越小, 簇内通信代价能耗就越小。簇内距离指标按式(5)计算:

$$C_{DI} = \frac{C_{DI}^2}{D_{C_i}^2} \quad (5)$$

第  $I$  个簇内, 各个节点到簇首的距离的平方和为:

$$C_{DI}^2 = \sum_{j=1}^{m-1} d_{ij}^2 = \sum_{j=1}^{m-1} ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2) \quad (6)$$

式中,  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$  分别表示簇首和簇内其它节点的坐标。当簇首发生改变时, 这个值也会跟着发生改变。

**定义 2**(节点的单位比特能耗指数, energy consumption index, EI) 它等于发送单位数据到汇点所需要能耗与节点当前剩余能量之比。若节点的能耗指数越高, 则该节点就越不适宜选择为中继簇首。EI 用式(7)表示为:

$$EI = \frac{E_{elec} + E_{amp} d^n}{E_r} = \begin{cases} \frac{E_{elec} + \epsilon_{ts} d^2}{E_r}, & d \leq d_0 \\ \frac{E_{elec} + \epsilon_{mp} d^n}{E_r}, & d > d_0 \end{cases} \quad (7)$$

**定义 3**(簇首竞争指标, Competition Index, CI) 它定义为簇内通信代价能耗与该节点到汇点的通信代价能耗之和, 其计算公式如下:

$$CI = \alpha(C_{DI}) + \beta(EI) = \alpha\left(\frac{C_{DI}^2}{D_{C_i}^2}\right) + \beta\left(\frac{E_{elec} + E_{amp} d^n}{E_r}\right) \quad (8)$$

CI 的值越小, 则该节点当选为簇首的概率就越大。

由于 WSNs 资源受限, WSNs 路由协议的重要目标之一就是合理高效地使用网络中各个节点的能量, 延长网络寿命。在以分簇方式组织的传感器网络中, 路由分为簇内通信和簇间通信两部分。当簇成员与簇首之间传输数据时, 采用 TDMA 单跳通信的方式, 这样易于调度各成员节点的数据传输。研究表明, 簇首向汇点进行长距离数据传输时, 采用多跳路由的方式更能降低能耗<sup>[15]</sup>。

本文创新地设计了一种基于剩余能量、能量消耗因子、RSSI 以及距离能耗指标的自适应周期分布式路由机制。在簇首选择上不仅关注簇内通信能耗, 同时考量距离指标; 在簇首路由路径选择上, 联合物理层的距离、能量消耗因子、MAC 的 RSSI 值, 将物理层的发射功率调整到最适合的级别。与已有的方法相比, 本文提出的方法更能均衡网络中节点的能耗, 延长网络生命周期, 降低通信控制开销, 更适合传感器网络的传输要求。

#### 4 跨层自适应周期分簇路由模型(CACR)

簇首既负责收集本簇信息, 又要将本簇的数据包转发给更靠近汇点的邻簇首。在簇首的选择上, 既要关注簇内通信消耗, 又要考虑簇间路由能耗。无线传感器网络跨层自适应周期分簇路由模型 CACR 总体目标是延长网络寿命、高能效以及较高的吞吐量、较低的控制开销。CACR 分为两个过程:

簇首生成和簇首间多跳路由由建立。

##### 4.1 跨层自适应簇首选举

簇初始化阶段:

**规则 1** 簇内的  $m$  个成员广播其节点信息 SN\_MSG ( $ID, Loc(x, y), EI$ ), 同时簇内的各成员  $i$  在这段时间根据式(3)计算出本簇内其他成员到自己的距离平方和, 每个节点记录 EI 值最小的节点信息。EI 值最小的节点就成为本簇的节点。

稳定工作阶段:

初始簇首形成以后, 本簇进入稳定工作阶段。簇首采用 TDMA 方式组织本簇内成员节点通信, 并按照一定规则进行簇内数据融合。簇间通信按照后面描述的簇间路由进行。

新一轮簇首竞选:

**规则 2** 当簇首节点消耗的能量是该节点成为簇首之前能量 ( $E_0^c$ ) 的  $\theta\%$  时, 即  $E_r = (1 - \theta) E_0^c$ , 或者  $E_r < E_{Threshold}$  ( $E_{Threshold}$  是节点成为簇首的最低能量阈值) 时, 当前簇首向本簇成员广播竞争下一轮簇首消息 CMP-NXT-CH-MSG()。

**规则 3** 本簇成员收到 CMP-NXT-CH-MSG() 消息后, 若自己的能量  $E_r > E_{Threshold}$ , 则节点根据式(8)计算出自己的 CI 值, 然后向簇首发送 CMP-CH-MSG( $ID, Loc(x, y), CI$ ), 簇首选择 CI 最小的节点并广播新的簇首节点消息 CH-MSG( $ID, Loc(x, y)$ ), 随后自己退为普通节点, 新的簇首开始工作。这期间, 没有参加竞争的节点进入睡眠状态, 直至本轮簇首选举结束。

以后, 每次簇首的选举均按照规则 2 和规则 3 进行。簇首按照 TDMA 方式组织本簇内成员通信; 当簇首有数据要转发时, 则按照下面描述的路由转发方式进行。

##### 4.2 跨层簇间路由模型

簇首收集本簇成员的数据并进行融合处理, 将数据以多跳通信的方式发送给汇点。本文假设数据的冗余度有限, 即来自不同簇的数据不需要进一步融合, 中继簇首只转发来自其他簇首的数据包。假定节点间的通信是对称的, 即两个节点彼此间进行通信时, 几乎使用相同的发射功率。设置 RSSI (Received Signal Strength Indication, RSSI, 接收信号强度指示) 阈值  $R_{threshold}$ , 即接收一个数据包所需要最小 RSSI。估计最小发射功率级需要 3 步:

(1) 每个簇首使用最大发射功率级  $P_{t,max}$  广播一条消息 CH\_MSG( $ID, EI, E_r$ );

(2) 其他簇首根据 RSSI 读数获得接收功率  $P_r$ , 通过式(9)<sup>[16]</sup> 计算最小发送功率级别  $P_{t,min}$ ; 然后, 向该簇首发送一个 CH\_NXTTHOP\_MSG( $ID, EI, E_r, P_{t,m}$ ) 消息。

$$P_{t,m} = \frac{P_{t,max} R_{threshold}}{P_r} \quad (9)$$

在这个阶段, 每个簇首节点精确地获得了到其下一跳簇首的良好链路质量的最小发射功率级。在整个路由阶段, 其动态地维护发射功率级。

(3) 簇首将收到的来自其他簇首的 CH\_NXTTHOP\_MSG 相应信息记入到路由表中。

当前簇首  $I$  到其下一跳簇首  $J$  的能量消耗因子表示单位比特距离能耗指标, 定义为:

$$EI_{I,J} = \frac{E_{elec} + E_{amp} d^n}{d_{I,J}^2}$$

$$= \frac{E_{elec} + E_{amp} [\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}]^n}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (10)$$

式中,当  $d > d_0$  时,  $n=4$ , 否则  $n=2$ 。

当前簇首需要发送数据时,其下一跳簇首的选择为:

$$C_{NHP} = \arg \min_{j \in I_{th}} (E_{C_{i,j}} + E_{I_j} + \frac{1}{E_{r_j}}) \quad (11)$$

式中,  $I_{th}$  表示簇首  $I$  的邻居簇首集合,  $E_{I_j}$  和  $E_{r_j}$  分别表示簇首  $I$  的邻居簇首  $j$  与汇点之间的单位能耗指数(根据式(7)计算)以及邻居簇首  $j$  当前剩余能量。

此外,引入一个阈值 TD-MIN,如果簇首到汇点的距离小于 TD-MIN,则它直接将数据包发送给汇点。若距离大于 TD-MIN,则根据式(11)计算出最佳下一跳簇首,将其调整到对应的发射功率,并将数据发送给该簇首。数据以此方式继续往下传输,直至汇点。

## 5 实验及分析

### 5.1 仿真环境及参数设置

本文采用 OMNET++<sup>[17]</sup> 对自适应周期分簇性能模型进行性能分析与评估。假设采用理想的 MAC 协议,忽略无线链路中可能发生的分组丢失错误。实验中统计传感器节点接收数据、融合数据和发送数据所消耗的能量,计算网络的存活时间,以分析性能模型的能量效率。为了证明所提出的性能模型路由协议的能效均衡以及能量高效,将本协议算法与 LEACH 与 MACRO<sup>[18]</sup> 协议进行了比较。仿真区域:  $500 \times 500 \text{m}^2$ , 节点数:  $50 \sim 300$ ; 节点初始能量:  $1\text{J}$ ; 数据包大小:  $200$  字节; 广播包大小:  $25$  字节; 能量消耗模型相关参数与文献 [6] 相同(即  $E_{elec} = 50 \text{nJ}$ ,  $\epsilon_{fs} = 10 \text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$ ,  $\epsilon_{mp} = 0.0012 \text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$ ,  $E_{fusion} = 5 \text{nJ}/\text{bit}$ )。

### 5.2 实验结果及性能分析

实验中主要监测网络节点平均能耗、归一化网络生命时间、网络吞吐量以及控制开销等指标。图 1 是仿真时间为  $4000\text{s}$  时网络中节点数和节点平均能耗的比较。从图中可以看出,随着节点数目的增加,平均网络能耗减少。由于 CACR 算法在路由的下一跳选择上考虑了能量消耗因子、距离能耗指标以及节点剩余能量,并且簇首在转发数据包时根据 RSSI 值选择最适合的发射功率,因此其能耗较低;而 LEACH 算法是簇首直接将数据发送到汇点,能量消耗最大。

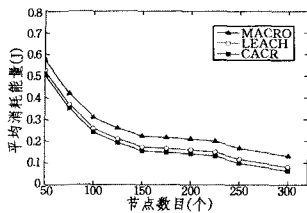


图1 不同节点数目时的平均能耗

图2将CACR算法与LEACH和MACRO算法进行归一化网络生命比较。归一化网络生命是网络中第一个节点耗能量所用的时间与节点平均生命时间之比。从图2中可以看到,随着节点数目的增加,归一化网络寿命逐渐降低,这是由于随着节点数目的增加,在选择下一跳节点时的余地比较大,从而可以延长平均节点的寿命。LEACH比MACRO网络寿命更长,LEACH算法采用分簇方式,并进行簇头轮转,因此减少了单个节点的位传输数据。而CACR比LEACH性能更好的原因在于,CACR算法在簇首以及下一跳节点的

选择时考虑了距离能耗因子,可以很好地在节点间平衡能量消耗,从而使网络中节点能耗比较均匀,可以让网络在更长的时间内保持连通而不断裂,从而延长了网络寿命。

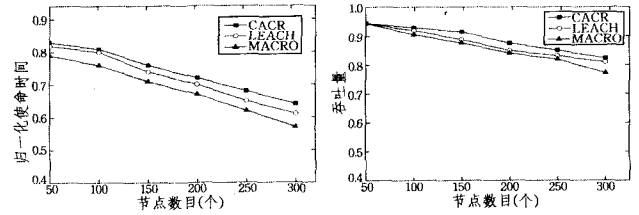


图2 不同节点数目时的归一化网络寿命 图3 不同节点数目时的网络吞吐量

图3将CACR算法与LEACH和MACRO算法的节点数目与吞吐量的关系进行比较。随着节点数目的增加,网络吞吐量逐渐降低,这是由于发送数据的节点遭到碰撞和干扰等不利因素也会增加。MACRO吞吐量最低的原因在于节点数据独立发送,没有形成簇,节点发送数据时遇到的不利因素的影响概率比分簇结构要大,因为簇首节点数目比网络中节点数目少得多。CACR的吞吐量比LEACH高的原因在于,CACR在选择下一跳转发节点时根据距离因子、能耗因子等,选择最适合的发送功率进行数据发送。

图4将CACR算法与LEACH和MACRO算法进行控制开销比较。控制开销定义为在一次仿真运行中控制包消耗能量与数据传输包消耗能量之比。随着节点密度的增加,需要发送和接收更多的控制包。CACR比LEACH控制开销低的原因是整个网络生命期间不需要不断地进行簇的重组,CACR吞吐量比LEACH高,可以发送更多的数据包,CACR调整中继节点的发射功率,以减少控制开销。当发送数据节点增多,发送数据量大时,MACRO每个节点在发送数据时都需要唤醒,终极节点选择以及控制ACK等非数据传输包传输较多,控制包收发比非分簇方式大得多,消耗能量较大。

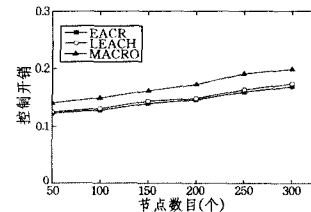


图4 不同节点数目时的控制开销

**结束语** WSNs的应用范围广泛。由于WSNs节点处理、存储以及电池容量等资源稀缺,应设计一个简单而有效的网络通信,以延长网络寿命。本文提出的分布式、跨层自适应周期能效分簇路由模型,利用分簇和跨层的优点,在簇内以及簇间通信时选择能效最佳的节点,从而提高了通信质量,延长了网络寿命。在OMNET++上的仿真表明,CACR可以提高整个网络的能效,延长网络寿命,提高网络吞吐量等,同时具有较小的控制开销。

## 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Comm. Mag., 2002, 40(8): 102-116
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [3] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404

(下转第78页)

- [5] Juels A, Rivest R, Szydlo M. The blocker tag: Selective blocking of RFID tags for consumer privacy [C]//Proc of the 8th ACM Conf on Computer and Comm Security. New York, ACM, 2003: 103-111
- [6] Sarma S, Weis S, Engels D. RFID systems and security and privacy implications [C]//Proc of the 4th Int Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems. Berlin: Springer, 2002: 454-469
- [7] Weis S A, Sarma S E, Rivest R L, et al. Security and privacy aspects of low-cost radio frequency identification systems [C]//Proc of the 1st Security in Pervasive Computing. Berlin: Springer, 2003: 201-212
- [8] Henrici D, Mauller P. Hash-based enhancement of location privacy for radio-frequency identification devices using varying identifiers [C]//Proc of the 2nd IEEE Annual Conf on Pervasive Computing and Communications Workshops. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2004
- [9] Juels A, Pappu R. Squealing euros: Privacy-protection in RFID-enabled banknotes [C]//Proc of the Financial Cryptography. Berlin: Springer, 2003: 103-121
- [10] Lee Y-C, Hsieh Y-C, You P-S, et al. A New Ultralightweight RFID Protocol with Mutual Authentication [C] // Proc. of WASE09. Volume 2. ICIE. 2009: 58-61
- [11] Burmester M, Van Le, De Medeiros T, et al. Universally composable RFID identification and authentication protocols [J]. ACM Trans. Inf. Syst. Secur, 2009, 12(4): 21-33
- [12] Avoine G, Tchamkerten A. An Efficient Distance Bounding RFID Authentication Protocol: Balancing False-acceptance Rate and Memory Requirement [C] // Information Security Conference-ISC09, volume 5735 of Lecture Notes in Computer Science, Pisa, Italy, 2009
- [13] Hernandez-Castro J C, Tapiador J M E, Peris-Lopez P, et al. Cryptanalysis of the SASI Ultralightweight RFID Authentication Protocol with Modular Rotations [C]//Proc. of WCC'09. Lofthus, Norway, 2009: 10-15
- [14] Peris-Lopez P, Hernandez-Castro J C, Estevez-Tapiador J M, et al. Shedding. Some Light on RFID Distance Bounding Protocols and Terrorist Attacks [C]//arXiv.org. Computer Science, Cryptography and Security, 2009
- [15] Ben-or M, Goldwasser S, Kilian J, et al. Multi-prover Interactive Proofs: How to Remove Intractability Assumptions [C]//20th ACM Symposium on the Theory of Computing. Chicago: Iliion is Association for Computing Machinery, 1988
- [16] Rhee K, Kwak J, Kim S, et al. Challenge-response based RFID authentication protocol for distributed database environment [C]//Proc of the 2nd Int Conf on Security in Pervasive Computing. Berlin: Springer, 2005: 70-84
- [17] 丁振华, 李锦涛, 冯波. 基于 hash 函数的 RFID 安全认证协议研究 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(4): 583-592
- [18] Lee S. Mutual authentication of RFID system using synchronized secret information [D]. Daejeon, Korea: School of Engineering, Information and Communications University, 2005
- [19] 高磊. 基于椭圆曲线密码的 RFID 安全协议 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 45-46
- [20] Wolkerstorfer J. Is Elliptic-Curve Cryptography Suitable to Secure RFID Tags? [C]//Workshop on RFID and Lightweight Crypto. Graz, Austria, 2005
- [21] 刘丹. 基于 ISO 18000-6C 协议的 RFID 安全标签的研究与开发 [D]. 复旦大学, 2009: 35-37

(上接第 59 页)

- [4] Goldsmith A, Wicker S. Design Challenges for Energy-constrained Ad Hoc Wireless Networks [J]. IEEE Communications, 2002, 9(4): 8-27
- [5] Rugin R, Mazzini G. A simple and efficient MAC-routing integrated algorithm for sensor network [C]//2004 IEEE Int'l Conf. on Communications. 2004: 3499-2503
- [6] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [A]//Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences [C]. IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014
- [7] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [8] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 336-379
- [9] Bandyopadhyay S, Coyle E J. An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks [A]//INFOCOM Communications Societies [C]. IEEE, 2003: 1713-1723
- [10] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议 [J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36
- [11] Gungor V C, Vuran M C, Akan O B. On the cross-layer interactions between congestion and contention in wireless sensor and actor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2007, 5: 897-909
- [12] Bai Yuebin, Liu Shujuan, Sha Mo, et al. An Energy Optimization Protocol Based on Cross-Layer for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Communications, 2008, 3(6): 27-34
- [13] Lin Xiao-hui, Kwok Y-K, Wang Hui. Cross-layer design for energy efficient communication in wireless sensor networks [J]. Wirel. Commun. Mob. Comput., 2009, 9: 251-268
- [14] Bouabdallah F, Bouabdallah N, Boutaba R. Cross-Layer Design for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks [A]//IEEE International Conference on Communications (ICC '09) [C]. 2009, 6: 1-6
- [15] Sohrali K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27
- [16] CC1000 A unique UHF RF Transceiver [EB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf>
- [17] <http://www.omnetpp.org>
- [18] Galluccio L, Leonardi A, Morabito G, et al. A MAC/Routing cross-layer approach to geographic forwarding in wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2007, 5: 872-884