

# 基于多属性决策的 WSNs 分布式能量均衡路由<sup>\*</sup>

王 楷, 邓仲芬, 石为人, 王小刚  
(重庆大学自动化学院 重庆 400044)

**摘 要:** 针对无线传感器网络中现有路由能耗不均问题, 提出一种基于多属性决策的能量均衡路由算法 (distributed multiple attribute-based energy-balance routing, DMAE)。通过引入节点负载预测机制、传输总能耗 (total transmission energy cost, TEC) 等, 建立多属性决策模型。将节点的前向邻居的能量、综合负载、传输总能耗等参数定义为模型中的属性。根据构建的前向邻居列表信息, 使用相对熵计算各属性的权重, 确定决策模型。节点依据该决策模型选出最优的前向邻居中转数据, 使全网能耗均衡。仿真结果表明, 与 MTE (minimum transmitted energy)、EAR (energy-aware routing)、DEBR (distributed energy balanced routing) 协议相比, DMAE 能够更好地均衡全网能量分布, 提高能量利用率, 从而延长网络生存时间。

**关键词:** 无线传感器网络; 多属性决策; 能量均衡; 负载预测; 前向邻居

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Distributed multiple attribute-based energy-balance routing for wireless sensor networks

Wang Kai, Deng Zhongfen, Shi Weiren, Wang Xiaogang  
(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Uneven energy distribution, which severely influences network lifetime, is a prevailing problem existing in many routing protocols for wireless sensor networks. To solve this problem, a distributed multiple attribute-based energy-balance routing (DMAE) is proposed. Through introducing load prediction mechanism and total transmission energy cost (TEC), we define parameters like residual energy, comprehensive load and TEC as attributes that are employed to establish a multiple-attribute decision making model. Weights of these attributes are calculated by using relative entropy based on information of node's forward neighbor table. Each node selects the optimal forward neighbor to relay packets according to the decision making model, which can effectively balance energy consumption of all nodes. Simulation results show that by comparing with MTE (minimum transmitted energy), EAR (energy-aware routing), DEBR (distributed energy balanced routing), DMAE has better energy-balancing effect and energy efficiency, which prolongs network lifetime.

**Key words:** wireless sensor networks (WSNs); multiple-attribute decision making; energy balance; load prediction; forward neighbor

## 1 引 言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 应用环境的推广对其寿命及路由性能提出了更高要求<sup>[1-2]</sup>, 尤其是需要 WSNs 周期性采集数据的环境监测中, 寿命是十分重要的应用需求条件。由于 WSNs 节点资源有

限, 其网络能耗以及路由协议<sup>[3]</sup>的性能直接影响网络的生存时间。目前, 设计各种能量意识、能量高效均衡的路由协议成为国内外研究的热点。传统分簇路由<sup>[4]</sup>中, 簇首能耗过快, 易成为瓶颈节点, 造成网络分割, 影响网络性能, 严重时可能使网络瘫痪。基于混合能耗机制改进的分簇算法<sup>[5]</sup>通过使用簇间能耗平衡机制和簇内不平衡能耗机制, 减少了广播能耗; 基于簇内协同机制的数据汇

收稿日期: 2011-05 Received Date: 2011-05

<sup>\*</sup> 基金项目: 工信部 2011 年物联网发展专项资金、中央高校基本科研业务费 (0215005202018) 资助项目

聚算法 CC-DAM( cooperative cluster based data aggregation mechanism) [6] 具有能量有效性,但需要节点的地理位置信息;从(准)瓶颈节点角度出发的新聚类方法 [7] 均衡了部分节点的能耗;EOR( energy optimal routing) [8] 算法是基于链式网络结构而提出;MTE [3] 协议选择能耗最小路径传输数据,单路径使网络能耗不均;EAR [9] 协议建立源节点到 sink 的多条路径,节点在其路由表中使用与传输代价相关的概率选择下一跳节点,其多路径策略在一定程度上均衡了能耗最小单路径的能耗,但其选择下一跳节点的考虑因素单一;MiniTE( minimum routing time and energy consumption) [10] 仅考虑能耗与路由时间,根据 RSSI( received signal strength indication) 将网络划成不同区域,区域中的节点向其父节点发送数据直到 sink;能量均衡路由 MRE( maximum residual energy) 选择具有最大剩余能量的节点转发数据,虽能在一定程度上均衡节点能耗,但容易导致路径过长、回环,并增加时延;Sudip Misra 等人提出的 LEO( simple least-time energy-efficient routing protocol with one-level data aggregation) [11] 协议仅依据邻节点剩余能量及到基站的时间,选择最小时间或者最大剩余能量的邻节点转发数据,且其为事件驱动协议,不适用于周期性采集数据的网络;Julio Barbancho 等人提出的 SIR( sensor intelligence routing) [12] 协议引入人工智能技术,虽能提高网络 QoS( quality of service),如降低时延,但 AI( artificial intelligence) 算法增加了节点的计算能耗与复杂度;SRP( self-selecting reliable path routing) [13] 协议保留了 SHR( self-healing routing) 的路由修复机制,中继节点基于广播通信及传输退避时延的优先级策略进行数据包转发,提高了路由可靠性,但对全网能耗均衡问题欠缺考虑;Chang-Soo Ok 等人提出的 DEBR [14] 算法基于节点间能耗与剩余能量比值寻找一条从源节点到基站能量既充足又高效的路径,以追求网络能量平衡。DEBR 未考虑节点负载情况,若数据包丢失重传频率增加,反而会加速网络能量消耗。上述各种路由算法都有其各自的优缺点,均未全面考虑各种因素。

本文针对现有路由中网络能量分布不均、“热点”、节点负载过重导致的数据包重传能耗等问题,综合考虑节点的各种因素,提出一种基于多属性决策的能量均衡路由算法,构造节点的前向邻居信息表,包含前向邻节点 ID、剩余能量、综合负载、传输总能耗 TEC,依据相对熵求取属性权重,综合加权前向邻节点的负载、能耗等属性,选择最优前向邻节点转发数据,避免路径回环,分散数据流、均衡节点能耗,缓解“热点”问题,最终提高网络能量利用率、延长网络寿命。

## 2 网络模型

节点随机均匀部署在一个正方形监测区域内,部署后不再移动,基站位于区域外的一个固定位置;节点具有

唯一 ID 号,所有节点同构,且均由能量有限的电池供电;节点发射功率可调,即可根据接收者距离远近调整其发射功率;链路对称,即节点间链路具有双向性。

假设部署后的网络中有  $n$  个传感器节点。每个节点本身具有获取接收信号强度指示 RSSI 数据  $P_r$  的功能。 $e_{iB}$  表示任意节点  $i$  发送数据到基站( base station, BS) 所需的能量,其值可根据 RSSI( received signal strength indication) 计算求得  $e_{iB} = P_s - P_r$ ,  $P_s$  为信号发射强度,其值携带于数据包中。若  $e_{jB} \leq e_{iB}$ ,则表示  $j$  为  $i$  的前向邻居。根据建立的网络拓扑结构,节点  $i$  可构建一个前向邻居集合  $(N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_m)$ ,  $m$  为其前向邻居数。设  $E_i$  为节点  $i$  的当前能量值。

## 3 DMAE 算法

### 3.1 属性定义

属性 1: 传输总能耗 TEC

节点  $i$  发送数据到节点  $j$  的能量消耗可用  $EC_{ij}$  衡量,如式(1)所示:

$$EC_{ij} = e_{ij}/E_i \quad (1)$$

$EC_{ij}$  从能量效率  $e_{ij}$  及节点剩余能量  $E_i$  两方面综合衡量路由路径的性能。节点  $i$  传输数据至基站的路径上所有 EC 之和(即 TEC)的大小体现了路径的能量效率及网络的能量均衡性。假设节点  $i$  通过节点  $j$  传输数据至基站,则传输总能耗  $TEC_{iB}$  为:

$$TEC_{iB} = EC_{ij} + EC_{jB} = \frac{e_{ij}}{E_i} + \frac{e_{jB}}{E_j} \quad (2)$$

传输总能耗 TEC 的引入可以缓解“热点”问题,如图 1 所示,靠近基站的节点  $n_1$  因中转其他节点的大量数据而迅速消耗其能量,导致其能量水平较低,当  $n_2$  需向基站传送数据时,按照传统路由,会选择  $n_1$  中转其数据,在本文算法中  $n_1$  与  $n_3$  均为  $n_2$  的前向邻居,综合考虑  $n_1$  与  $n_3$  的负载、剩余能量及对应的 TEC 后,  $n_2$  会选择  $n_3$  中转其数据,从而减轻“热点” $n_1$  的负担,均衡基站附近区域的能量分布。

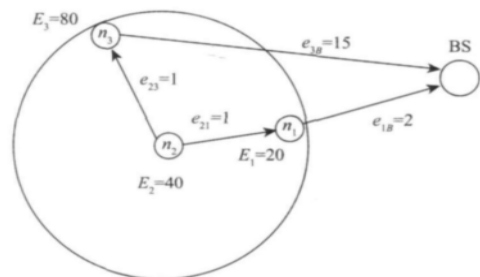


图 1 网络“热点”示意图

Fig. 1 Hot spot in network

属性 2: 综合负载  $L$

当前负载: 节点  $i$  在时间间隔  $T_i$  内自身产生的数据包为  $L_i^s(T_i)$ , 接收到邻节点的数据包数量为  $L_i^N(T_i)$ , 则

其当前负载  $L_i(T_i) = L_i^s(T_i) + L_i^N(T_i)$ , 具体为时间间隔  $T$  内节点的缓存队列中的数据包数量。

网络的中转节点需转发大量数据, 其缓存空间有限, 当存储空间已满时将无法接收其他节点发送的数据包, 从而引起数据包丢弃, 影响网络性能, 且大量转发任务将快速消耗中转节点的能量, 因此需均衡各个中转节点的负载以均衡其能耗。传统路由只考虑节点的当前负载, 总是在出现节点缓存已满、数据包丢弃的情况后采取措施, 属于被动控制方式。本文引入预测机制预测节点在  $T_{i+1}$  时间内的负荷情况, 可主动避免节点负载过重以及由此引起的数据包丢失, 为数据路由提供合理的依据。

预测负载: DMAE 算法采用短相关模型中的自回归滑动平均模型(ARMA)对节点负荷进行一步预测<sup>[15]</sup>, 文献[15]验证了该模型的预测精度, 证明了该模型可应用于无线传感器网络。使用该预测模型得到节点  $i$  在  $T_{i+1}$  时间内的预测负载为  $L_i(T_{i+1})$ 。

综合负载: 节点当前负载与预测负载加权得到综合负载  $L_i$  为:

$$L_i = \alpha \cdot L_i(T_i) + \beta \cdot L_i(T_{i+1}) \quad (3)$$

式中:  $\alpha + \beta = 1$ , 且  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$ ,  $\alpha, \beta$  的取值可根据具体应用进行设置。将节点当前负载与预测负载综合加权得到的负载  $L_i$  作为节点属性之一, 可更均匀地分配网络流量、均衡各节点负载与能量、并增加路由可靠性。

### 3.2 决策模型

#### 3.2.1 模型建立

节点  $i$  的前向邻居集合  $(N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_m)$  为其数据的路由提供了  $m$  种选择方案。每种方案都有其属性集  $P_j = (P_{j1}, P_{j2}, \dots, P_{jl})$ , 其中  $l$  为属性个数, 包括前向邻居  $N_j$  的综合负载及其对应的 TEC 等成本型属性,  $N_j$  的剩余能量等效益型属性。矩阵  $P = (P_{jk})_{(m \times l)}$  为方案集对属性集的评价矩阵。由于各属性的数量级和量纲互不相同, 需对评价矩阵进行规范化处理。

1) 确定第  $k$  项属性 ( $k = 1, 2, \dots, l$ ) 的理想值  $P_k^*$  与负理想值  $P_k^-$ , 设  $U_1, U_2$  分别为成本型属性和效益型属性下标的集合, 则:

$$P_k^* = \min(P_{jk}), P_k^- = \max(P_{jk}), k \in U_1 \quad (4)$$

$$P_k^* = \max(P_{jk}), P_k^- = \min(P_{jk}), k \in U_2$$

2) 按式(5)进行属性归一化处理后, 得到无量纲的标准化决策矩阵  $A$ :

$$p_{jk} = \frac{P_{jk} - P_k^-}{P_k^* - P_k^-} \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1l} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{ml} \end{bmatrix} \quad (6)$$

规范化后, 第  $k$  项属性的理想值  $p_k^*$  与负理想值  $p_k^-$  可按照第1步的方法求出。

节点选择最优前向邻居转发数据所依据的决策模型为:

$$\max D_j = \sum_{k=1}^l \lambda_k p_{jk}, j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中:  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l)$  为各属性在决策模型中的综合权重, 其满足:  $\sum_{k=1}^l \lambda_k = 1$ , 且  $\lambda_k \geq 0$  ( $k = 1, 2, \dots, l$ )。

#### 3.2.2 确定权重

由信息理论可知, 系统  $A$  和  $B$  的相对熵<sup>[16]</sup> 如式(8)所示:

$$C = \sum_{i=1}^N \left\{ A_i \log \frac{A_i}{B_i} + (1 - A_i) \log \frac{1 - A_i}{1 - B_i} \right\} \quad (8)$$

式中:  $A_i, B_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 分别为系统  $A$  和  $B$  的状态,  $C$  越小表示系统  $A$  和  $B$  的状态差别越小。

根据相对熵的定义, 可求出  $s_k^*$  和  $s_k^-$ ,  $s_k^*, s_k^-$  分别为第  $k$  项属性 ( $k = 1, 2, \dots, l$ ) 与其理想值  $p_k^*$  和负理想值  $p_k^-$  的相对熵:

$$s_k^* = \sum_{j=1}^m \left\{ p_{jk}^* \log \frac{p_{jk}^*}{p_{jk}} + (1 - p_{jk}^*) \log \frac{1 - p_{jk}^*}{1 - p_{jk}} \right\} \quad (9)$$

$$s_k^- = \sum_{j=1}^m \left\{ p_{jk}^- \log \frac{p_{jk}^-}{p_{jk}} + (1 - p_{jk}^-) \log \frac{1 - p_{jk}^-}{1 - p_{jk}} \right\}$$

$$s_k^* \geq 0 (s_k^* = 0, \text{当且仅当 } p_{jk} = p_k^*, j = 1, 2, \dots, m);$$

$$s_k^- \geq 0 (s_k^- = 0, \text{当且仅当 } p_{jk} = p_k^-, j = 1, 2, \dots, m)。$$

由  $s_k^*, s_k^-$  得出属性  $k$  关于理想值的相对贴近度  $c_k$ :

$$c_k = \frac{s_k^-}{s_k^* + s_k^-}, k = 1, 2, \dots, l \quad (10)$$

当  $s_k^* = 0$  时,  $c_k = 1$ ,  $m$  种方案的属性  $k$  值都等于最优值, 所有方案的该属性值没有差异, 对决策所起的作用为零。当  $s_k^* \rightarrow 0$  时,  $c_k \rightarrow 1$ , 所有方案的属性  $k$  值越接近理想值, 属性值的差异越小, 对决策所起的作用越小, 因此, 该属性在决策模型中的综合权重越小。根据各属性关于理想值的相对贴近度可计算出其在决策模型中的综合权重值  $\lambda_k$ :

$$\lambda_k = \frac{1 - c_k}{\sum_{k=1}^l (1 - c_k)} \quad (11)$$

式(11)满足  $0 \leq \lambda_k \leq 1, \sum_{k=1}^l \lambda_k = 1$ 。

#### 3.3 算法流程

节点部署后, 基站向全网广播 initialization packet, packet 包含基站的发送功率。各节点根据 RSSI 及数据包中的发送功率计算出自身到基站的传输能耗  $e_{iB}$ , 并存储。节点以最大通信半径向其邻节点发送组网回复 Net-Ack。

节点  $i$  接收到其他节点(如  $j$ ) 发送的组网回复 Net-Ack packet 时, 根据  $e_{iB} \geq e_{jB}$  是否成立判断其前向邻居, 若成立, 计算  $e_{ij}$ , 将节点  $j$  添加到前向邻居列表中, 列表中的字段为: 邻节点 ID、当前能量、综合负载、 $e_{ij}$ 、 $e_{jB}$ ; 否则, 视节点  $j$  为其后向节点。节点  $i$  将其后向节点 ID 加入 Net-Ack packet 尾部, 继续广播, 直至基站获得所有在线节点信息。全网初始化过程如图 2 所示。

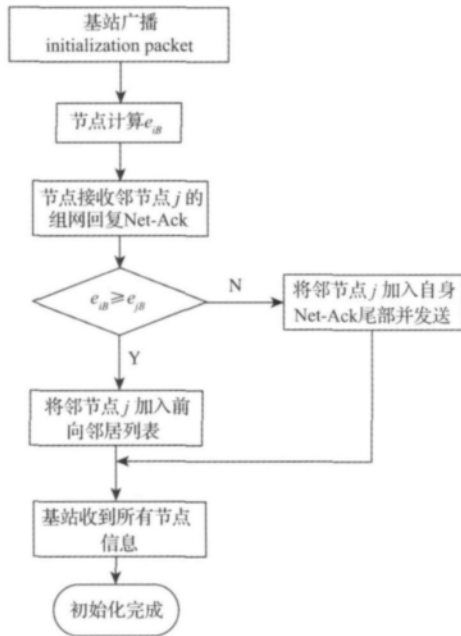


图 2 网络初始化流程框图

Fig. 2 Flow chart of network initialization process

初始化完成后, 所有节点建立了其前向邻居列表。节点发送数据时, 先计算其各个前向邻居对应的 TEC 值, 再求取邻节点剩余能量、综合负载、TEC 各属性的权重, 确定决策模型, 根据该模型选择最优前向邻居中转数据, 数据传输阶段伪代码如下:

BEGIN

Establish Decision Model

Get the best neighbor from forward neighbor table

Forward Packet

END

每隔时间  $T$ , 节点根据预测模型预测下一个  $T$  内的负载, 将该  $T$  时间内收到的数据包数量与预测负载加权计算后, 得出节点的综合负载情况, 然后节点向其邻节点广播更新消息, 包含自身 ID、剩余能量、综合负载。所有节点接收到邻节点的更新消息后, 进行判断并更新前向邻居的剩余能量与综合负载, 从而更新其前向邻居列表信息。节点需发送数据时, 重新计算各属性权重, 确定决策模型, 从而重新选择最优前向邻节点转发数据, 实现路由的更新维护、全网能耗的均衡。

## 4 仿真实验

本文使用 OMNeT++ 对 DMAE 算法进行仿真实验, 从网络寿命、全网总能量、节点剩余能量的标准差等性能指标方面与 MTE、EAR、DEBR 协议进行对比。仿真环境为: 100 个节点随机部署在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的正方形区域内, 基站位于正方形区域外的正上方中间位置, 节点初始能量为  $0.05\text{ J}$ , 最大通信半径为  $25\text{ m}$ ,  $E_{\text{elec}} = 50\text{ nJ/b}$ 。为模拟周期性采集数据的应用场景, 仿真实验中设节点每  $4\text{ s}$  产生一个数据包, 数据包长度为  $25\text{ B}$ ,  $T$  设为  $20\text{ s}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  分别为  $0.4$ 、 $0.6$ 。

节点剩余能量的标准差 (standard deviation)  $\sigma_E$  的计算公式如下:

$$\sigma_E = \frac{\sqrt{E\{[E_i - E(E_i)]^2\}}}{E_{\text{init}}} \quad i \in n \quad (12)$$

式中:  $n$  为网络的传感器节点总数,  $E_i$  为节点  $i$  的剩余能量,  $E_{\text{init}}$  为节点初始能量,  $E(E_i)$  为  $n$  个节点的平均剩余能量。

图 3 从网络活跃节点数随运行时间的变化情况方面对比了 4 种协议下的网络寿命, 当网络中出现第一个节点死亡的情况时, MTE、EAR、DEBR、DMAE 协议下网络的运行时间, 也即网络寿命, 分别为  $12\text{ min}$ 、 $21\text{ min}$ 、 $45\text{ min}$ 、 $60\text{ min}$  左右。这是由于: MTE 一直使用能耗最小的单路径传输数据, 导致该路径上的节点能量很快耗尽而死亡, 因此, 其网络寿命最短; EAR 协议使用多路径策略相较于 MTE 均衡了单路径上节点的能耗, 但其多路径策略只是建立在传输代价之上, 忽略了节点的能量因素, 同样会导致低能量节点转发过多数据而提早死亡, 因此, 其寿命相较于 MTE 得到了一定提高, 但能耗不均问题仍然影响了其寿命; DEBR 基于节点间能耗与剩余能量的比值建立能量充足高效的路由路径, 达到了一定程度的能量平衡, 避免了 MTE 与 EAR 中节点过早死亡的现象, 但它未考虑节点的负载状况, 负载过重引起的数据包丢失重传会加快节点的能量消耗; 而本文算法 DMAE 采用基于多属性的方法综合考虑转发节点的能量、负载、传输总损耗等因素, 避免了重复选择高能量或者低能耗的某部分节点以及负载过荷引起的数据包丢失重传能耗, 缓解了“热点”问题, 减少了能耗, 均衡了网络中所有节点的能量水平, 延长了网络寿命。当网络运行至活跃节点数占总数的  $75\%$  时, 如图 3 中所示, 该状态下 MTE、EAR、DEBR、DMAE 的网络运行时间分别为  $40\text{ min}$ 、 $54\text{ min}$ 、 $65\text{ min}$ 、 $81\text{ min}$ 。此时, 本文算法 DMAE 的网络运行时间相较于 DEBR、EAR、MTE 分别提高了  $24.6\%$ 、 $50\%$ 、 $102.5\%$ 。从图中还可看出, 网络第 1 个节点能量耗尽时, DMAE、DEBR 算法由于能量均衡策略, 其余节点的能量也已被消耗了大部分, 在这之后的运行过程中, 其活跃节点数量下降较快, 所有节点的失效时间比较接近; 而 MTE、EAR 由于网络中节点的能量水平并不均衡,

此时部分节点还具有较多的剩余能量,因此其活跃节点数下降速度较缓。

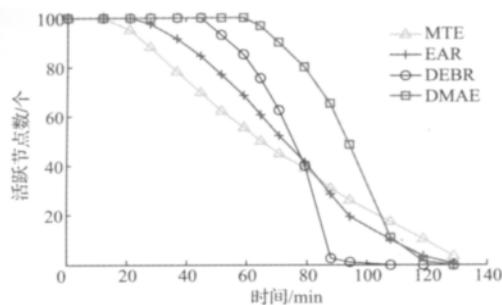


图3 4种协议网络寿命的对比

Fig. 3 Comparison of network lifetime

图4对比了4种协议全网总能量随时间变化的情况。从图中可得 MTE、EAR、DEBR、DMAE 在各自出现死亡节点时的全网总能量大小,即: MTE 在 12 min 时的总能量为 4.62 J、EAR 在 21 min 时的总能量为 4.59 J、DEBR 在 45 min 时的总能量为 4.17 J、DMAE 在 60 min 时的总能量为 3.88 J。由以上数据可以看出,在网络开始出现死亡节点的時刻,4种协议的全网总能量从小到大排序依次为: DMAE (3.88 J)、DEBR (4.17 J)、EAR (4.59 J)、MTE (4.62 J); 而此刻的网络能量利用率则由高到低依次为: DMAE (22.4%)、DEBR (16.6%)、EAR (8.2%)、MTE (7.6%)。前2种协议的全网总能量之所以比后两者的总能量少,是因为前两者的能量均衡策略使网络中节点的能量消耗比较平衡,推迟了第1个节点死亡的时间,并且此时的网络能量也被使用了比较大的一部分,网络的能量利用率高于后2种协议;后2种协议的能耗均衡性差,网络中第1个节点能量耗尽而死亡时,其他节点还剩余大量能量。此外,随着死亡节点数的增加,网络在 59 min 之后的运行过程中,EAR、DMAE、DEBR 的全网能量下降速度依次加快, MTE 的全网能耗速度反而变缓,原因为此时的 MTE 网络还存在少部分高能量节点,但网络连通性变差导致该部分节点的能量无法被全面利用,故其能量利用率不高。

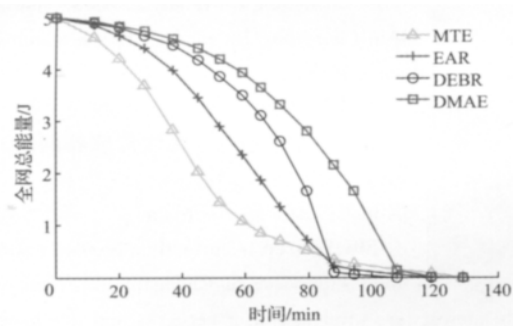


图4 4种协议全网总能量的对比

Fig. 4 Comparison of total energy in network

图5对比了4种协议节点剩余能量的标准差。从图中可以看出, DMAE、DEBR、EAR、MTE 节点剩余能量的标准差依次增大,其中 DMAE 节点剩余能量的标准差最小,表示 DMAE 算法使全网节点的能量分布最为均衡。由标准差的计算公式可知,当网络开始出现失效节点时,全网节点剩余能量的标准差将随着死亡节点数的增加而增大,如图5中,在 12 min、21 min、45 min 后, MTE、EAR、DEBR 的标准差随着死亡节点数增多而增大,节点能量分布更不均衡, DMAE 始终保持较低的节点剩余能量标准差,由此可看出,相较于前述3种协议, DMAE 在网络运行过程中能更好地均衡各个节点的能量水平,提高整个网络的能量利用率,最终延长网络寿命。

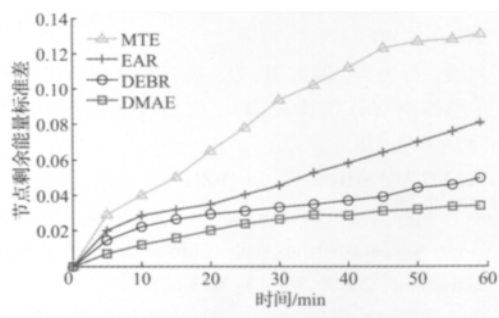


图5 4种协议节点剩余能量标准差的对比

Fig. 5 Comparison of standard deviation in residual energy

## 5 结 论

现有路由协议如 MTE 选择能耗最小的路径传输数据,虽然在一定程度上节能,但网络能量分布不均,影响网络寿命;能量意识路由由 EAR 构建多路径并基于概率选择,但其仅考虑传输代价;其他能量均衡路由如 DEBR 选择转发节点时考虑因素不全面,容易引起数据包丢失、重传,增加重传损耗。DMAE 综合考虑前向邻节点的能量、负载、传输总能耗等因素,选择最优的前向邻节点中转数据,邻节点综合负载的引入避免了数据丢失重传的损耗,传输总能耗的引入可缓解“热点”问题,这些使得全网能量分布更为均衡,最终延长了网络生存时间。

DMAE 为多跳路由,比较适用于小规模网络,在大规模网络中由于跳数增加可能会引起较大的传输时延,能耗也会增加,下一步研究作为如何将 DMAE 与分簇路由结合,提高协议扩展性,使协议可更好地应用于大规模网络。

## 参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, SU W L, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] 王恒, 李敏, 刘其琛, 等. 一种基于确定性调度的工

- 业无线网络路由算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(9): 1921-1928.
- WANG H, LI M, LIU Q CH, et al. Routing algorithm for industrial wireless network based on deterministic scheduling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 1921-1928.
- [3] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3: 325-349.
- [4] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. IEEE Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences, Hawaii, 2000: 175-187.
- [5] 向敏, 石为人, 罗志勇, 等. 基于混合能耗机制的无线传感器网络分簇算法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4): 673-678.
- XIANG M, SHI W R, LUO ZH Y, et al. Hybrid energy consumption mechanism based clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(4): 673-678.
- [6] 夏娜, 徐普君, 唐媚, 等. WSNs 中协同簇数据汇聚机制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(4): 307-312.
- XIA N, XU P J, TANG M, et al. Research on cooperative cluster based data aggregation mechanism in WSNs[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(4): 307-312.
- [7] 底欣, 张百海. 无线传感器网络瓶颈节点判断及路由方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(9): 1973-1980.
- DI X, ZHANG B H. Bottleneck node detection and routing method for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 1973-1980.
- [8] JIANG H F, QIAN J SH, SUN Y J, et al. Energy optimal routing for long chain-type wireless sensor networks in underground mines[J]. Mining Science and Technology (China), 2011, 21: 17-21.
- [9] SHAH R C, RABAIEY J M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Orlando 2002: 350-355.
- [10] LI W F, WANG R CH, SUN L J. MiniTE: Data acquisition routing for wireless sensor networks[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2009, 16(1): 16-21.
- [11] MISRA S, THOMASINOUS P D. A simple, least-time, and energy-efficient routing protocol with one-level data aggregation for wireless sensor networks[J]. The Journal of Systems and Software, 2010, 83: 852-860.
- [12] BARBANCHO J, LEON C, MOLINA F J, et al. Using artificial intelligence in routing schemes for wireless networks[J]. Computer Communications, 2007, 30: 2802-2811.
- [13] BABBITT T A, MORRELL C, SZYMANSKI B K, et al. Self-selecting reliable paths for wireless sensor network routing[J]. Computer Communications, 2008, 31: 3799-3809.
- [14] OK C S, LEE S, MITRA P, et al. Distributed energy balanced routing for wireless sensor networks[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57: 125-135.
- [15] 韩志杰, 王汝传, 凡高娟, 等. 一种基于 ARMA 的 WSN 非均衡分簇路由算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 865-869, 893.
- HAN ZH J, WANG R CH, FAN G J, et al. An unequal clustering algorithm in wireless sensor networks based on ARMA[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 865-869, 893.
- [16] 赵萌, 邱苑华, 刘北上. 基于相对熵的多属性决策排序方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 1098-1100, 1104.
- ZHAO M, QIU W H, LIU B SH. Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making[J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 1098-1100, 1104.

#### 作者简介



王楷, 2009 年在重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学自动化学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、移动机器人与机器视觉等。

E-mail: akyle@163.com

**Wang Kai** received the Ph. D. degree from Chongqing University in 2009. Currently, he is a lecturer in Chongqing University. His current research interests include wireless sensor network, mobile robotics and machine vision.



邓仲芬, 2009 年于重庆大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail: dzf20061987@163.com

**Deng Zhongfen** received her B. Sc. degree from Chongqing University in 2009. Now she is a M. Sc. candidate in Chongqing University. Her research interest is wireless sensor networks.



石为人, 现为重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、智能感知等。

E-mail: wrs@cqu.edu.cn

**Shi Weiren** is currently a professor and doctoral supervisor in Chongqing University. His research interests are wireless sensor networks and intellisense.