

基于能效优化的 WSNs 多径流量分配路由算法

郝晓辰* 贾楠 刘彬
(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 该文针对传感器节点能量受限的特点建立能效优化模型, 该模型兼顾网络传输能耗和能耗均衡特性, 以最大化网络节点总剩余能量和最小化剩余能量的方差为目标, 通过合理分配多条路径的流量来优化网络能效。利用权衡评价函数实现了模型的求解, 进而提出一种多径流量分配路由(MFAR)算法。仿真实验表明, 该算法能够合理配置各路径流量, 显著提高网络能量效率, 达到在降低网络能耗的同时保证能耗分布均衡的目标。

关键词: 无线传感器网络; 路由算法; 多路流量分配路由算法; 能效优化模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1568-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01370

Multipath Flow Allocating Routing Algorithm Based on Energy Efficiency Optimization in Wireless Sensor Networks

Hao Xiao-chen Jia Nan Liu Bin

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Considering at the characteristic that the energy of node is limited in wireless sensor networks, an energy-efficiency optimizing model both considering transmission energy consumption and its equilibrium characteristic is build in this paper. To make maximum of the total remaining energy and minimum of the remaining energy variance as optimal objectives, it optimizes energy efficiency of the network by reasonably allocating the flow on multipath. The weigh evaluation function is used to solve this model, and then a Multipath Flow Allocating Routing (MFAR) algorithm is proposed based on it. Simulation results show that, MFAR algorithm can reasonably allocate the flow on multipath, improve the network energy efficiency significantly, and achieve the goal of reducing energy consumption and balancing its distribution simultaneously.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSNs); Routing algorithm; Multipath Flow Allocating Routing (MFAR) algorithm; Energy-efficiency optimizing model

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由大量微型传感器节点以自组织方式构成的无线通信网络^[1], 由于其能够实时监测、感知和采集各种现场信息, 已被广泛应用于环境监测、医疗监护、工业控制、交通管理以及空间探索等领域^[2,3]。

路由协议一直以来都是无线传感器网络的研究热点^[4], 由于传感器节点能量受限, 而路由选择又直接影响节点的能耗情况, 因此, 如何高效地使用能量延长网络生命期成为现阶段路由设计的首要目标^[5-7]。针对上述问题, 已经有不少学者做了相关研究, 提出了一些能量有效路由协议^[8,9], 主要包括最

小能耗路由协议和能耗均衡路由协议两大类。最小能耗路由协议依据节点到基站的最小代价建立路径, 节省了网络资源^[10,11], 但协议只考虑传输能耗最小建立路由会使数据流分担不平衡, 导致某些节点因能量耗尽过早失效; 能耗均衡路由协议在路由选择过程中关注了能量消耗的均衡特性^[12-14], 但又无法保证网络的传输总能耗。为此, 本文认为路由协议的设计应该兼顾传输能耗和能耗均衡特性两方面, 单独考虑任一方面都有可能造成网络因能量资源利用不均或开销过大而提前死亡。

然而, 传统的单径路由多是将选择路径作为主要目标, 根据某个度量选出源节点到目的节点的一条最优路径, 这种基于目的节点的路径选择, 难以很好地兼顾能耗和均衡两方面因素, 而多径路由则在此方面表现出单径路由不能比拟的优势。能量感知多路径(EAR)协议^[15]依据概率在多路径中选择一条路径进行传输, 但该协议只是建立了多路径而并

2010-12-13 收到, 2011-04-13 改回

国家自然科学基金(60704037), 河北省自然科学基金(F2011203100), 河北省高等学校科学研究计划项目(2010162)和秦皇岛市科学技术研究与发展规划项目(201001A074)资助课题

*通信作者: 郝晓辰 haoxiaochen@ysu.edu.cn

未真正使用多路径，却忽略了多径路由作为一种先进的技术，不但能完成路径的选择，还可以实现多条路径上流量的分配与协调，完成网络能效的优化。文献[16,17]将流量分配定义为线性规划问题，设计了以最大化网络生命期为目标的路由算法，文献[18]从流量分配角度提出了一种自适应能耗均衡路由策略，然而上述几种算法未能充分考虑流量分配对网络传输能耗和能耗均衡特性这两方面因素的影响，本文借鉴了文献[16-18]中路由从流量分配角度出发的思想，设计了一种基于能效优化的多径流量分配路由算法，来优化网络能效。

基于上述分析，本文把多路径引入到能量有效路由中，建立能效优化模型，该模型以各链路流量为自变量，以最大化网络节点总剩余能量和最小化剩余能量的方差为目标；通过构建权衡评价函数将多目标整合为单目标，降低了模型的求解难度；并利用上述函数实现了模型的求解，进而提出一种基于能效优化的多径流量分配路由(Multipath Flow Allocating Routing, MFAR)算法。仿真实验表明，本算法能够合理配置各链路流量，实现传输能耗和能耗均衡特性的双重优化。

2 能效优化模型

由于节点相互协作进行数据传输，因此，WSNs的路由选择不仅关注单个节点能耗问题，更关注整个网络能量的利用效率，在路由选择时，需兼顾能耗和能耗均衡特性两方面因素。多径路由在均衡网络能耗、优化能效方面与单路径路由相比具有明显优势，多径并行传输则可以最大限度地发挥多径路由的上述优势。为此，本文采用多径并行传输方式来实现网络传输能耗和能耗均衡特性的双重优化。

2.1 模型建立

由于节点能耗与流过该节点的数据量大小存在密切联系，通过一个节点转发的数据量越大，其能耗就越大，而多径并行传输则可以通过协调多条路径上各节点的流量来实现网络能效的优化。考虑到数据可能进行多轮传输，每轮传输过后各节点的剩余能量有所区别，采用网络节点总剩余能量作为传输能耗的度量，更有利于延长低能量节点的寿命，进而延长网络生命期；方差是用来描述随机变量和其数学期望之间偏离程度的统计量，采用剩余能量的方差作为能耗均衡特性的度量，则可以保证剩余能量分布的均衡特性，减少瓶颈节点的出现，从而进一步延长网络寿命。鉴于总剩余能量和剩余能量的方差之间难以建立直接联系，本文将两者同时作为优化目标，以源节点到目的节点所有路径上的各

段链路的流量为自变量，建立多目标能效优化模型如下：

$$\max E_{re} = \sum_{i=1}^N E_{re}(i) = \sum_{i=1}^N \left(E_i - \sum_r \sum_j \sum_k E_{ij}^{\text{TX}} f_{ij}^{rk} - \sum_r \sum_{j:i \in N_j} \sum_k E_{ij}^{\text{RX}} f_{ji}^{rk} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \min \sigma_{re}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{re}(i) - \bar{E}_{re})^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(E_i - \sum_r \sum_j \sum_k E_{ij}^{\text{TX}} f_{ij}^{rk} - \sum_r \sum_{j:i \in N_j} \sum_k E_{ij}^{\text{RX}} f_{ji}^{rk} - \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N \left(E_g - \sum_s \sum_m \sum_t E_{gm}^{\text{TX}} f_{gm}^{st} - \sum_s \sum_{m:g \in N_m} \sum_t E_{gm}^{\text{RX}} f_{mg}^{st} \right) \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } f_{ij}^{rk} \geq 0, \quad i \in N, j \in N_j, r \in S, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_k \sum_{j:i \in N_j} f_{ji}^{rk} + \sum_k Q_i^k = \sum_k \sum_j f_{ij}^{rk}, \quad i \in N, j \in N_j, r \in S, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_r \sum_j \sum_k E_{ij}^{\text{TX}} f_{ij}^{rk} + \sum_r \sum_{j:i \in N_j} \sum_k E_{ij}^{\text{RX}} f_{ji}^{rk} \leq E_i, \quad i \in N, j \in N_j, r \in S, k \in K \quad (5)$$

其中 N 为网络节点总数， $E_{re}(i)$ 代表节点 i 的剩余能量， E_i 是节点 i 每一轮的初始能量， E_{TX} ， E_{RX} 分别为节点发送、接收单位 bit 数据消耗的能量， f_{ij}^{rk} 表示以 r 为源节点的第 k 条路径上的链路 ij 上的流量， Q_i 为节点 i 产生的流量，若节点 i 不是源节点，则 Q_i 为 0， Q_i^k 为节点 i 分配给第 k 条路径的流量。式(1)，式(2)代表以最大化网络节点总剩余能量和最小化剩余能量的方差为优化目标，式(3)为流量为正约束，式(4)是节点流量守恒公式，式(5)表示在任意节点处消耗的能量要小于节点的初始能量。

上述能效优化模型立足于网络整体，通过合理的协调与分配多条路径上各段链路的流量，在宏观上实现网络传输能耗和能耗均衡特性的双重优化，达到提高网络能量效率，延长生命期的目的。

由于直接对多目标优化问题进行求解存在一定困难，本文依据归一化思想构造一个综合考虑网络节点总剩余能量和剩余能量方差的权衡评价函数，将原多目标优化问题转化为单目标优化问题，以便于模型的求解。下面给出权衡评价函数 $w(f)$ 的公式：

$$w(f) = c_1 \cdot \frac{E_{re \max} - E_{re}(f)}{E_{re \max}} + c_2 \cdot \frac{\sigma_{re}^2(f) - \sigma_{re \min}^2}{\sigma_{re \min}^2} \quad (6)$$

式中 $E_{re\max}$ 和 $\sigma_{re\min}^2$ 分别为采用最小能耗和能耗均衡路由算法计算出的全网总剩余能量的最大值和剩余能量方差的最小值; $E_{re}(f)$ 和 $\sigma_{re}^2(f)$ 是采取当前流量分配策略 f 下的全网总剩余能量和剩余能量的方差。 c_1, c_2 为权衡系数, 当取 $c_1 = 1, c_2 = 0$ 时, 该模型为最小能耗路由模型; 若令 $c_1 = 0, c_2 = 1$, 就成了能耗均衡路由模型。

由式(6)可知, 权衡评价函数 $w(f)$ 由两部分组成, 即 $w(f) = c_1 \cdot w_1(f) + c_2 \cdot w_2(f)$, $w_1(f)$ 和 $w_2(f)$ 可分别表示为

$$w_1(f) = \frac{E_{re\max} - E_{re}(f)}{E_{re\max}} \quad (7)$$

$$w_2(f) = \frac{\sigma_{re}^2(f) - \sigma_{re\min}^2}{\sigma_{re\min}^2} \quad (8)$$

其中 $w_i(f)$ 分别反映了目标函数 $E_{re}(f)$, $\sigma_{re}^2(f)$ 与 $E_{re\max}$, $\sigma_{re\min}^2$ 的接近程度, $w_i(f) \in [0, +\infty)$, 当 $E_{re}(f)$, $\sigma_{re}^2(f)$ 越接近 $E_{re\max}$, $\sigma_{re\min}^2$ 时, $w_i(f)$ 越接近 0; 反之, $w_i(f)$ 越大。这样设计是为了将两个优化目标函数的量纲进行统一, 进而保证权衡评价函数的合理性。

经过权衡评价函数的整合, 原优化模型的求解就转化为权衡评价函数的最小化求解问题, 简化模型如式(9)所示。

$$\left. \begin{aligned} \min w(f) &= c_1 \frac{E_{re\max} - E_{re}(f)}{E_{re\max}} + c_2 \frac{\sigma_{re}^2(f) - \sigma_{re\min}^2}{\sigma_{re\min}^2} \\ \text{s.t. } f_{ij}^{rk} &\geq 0, f_{ij}^{rk} \in f \\ \sum_k \sum_{j,i \in N_j} f_{ji}^{rk} + \sum_k Q_i^k &= \sum_k \sum_j f_{ij}^{rk}, f_{ij}^{rk} \in f \\ \sum_r \sum_j \sum_k E_{ij}^{\text{TX}} f_{ij}^{rk} + \sum_r \sum_{j:i \in N_j} \sum_k E_{ij}^{\text{RX}} f_{ji}^{rk} &\leq E_i, \\ f_{ij}^{rk} &\in f \end{aligned} \right\} (9)$$

其中 f 是路径上各段链路的流量 f_{ij}^{rk} 组成的集合, 称这种满足约束条件的流量分配策略集合 f 为优化问题的可行解, 由所有可行解组成的集合叫做优化问题的可行域 F 。该模型的作用为: 在可行域 F 中找到一种流量分配策略使权衡评价函数的值最小。

多目标优化问题转化为单目标优化问题, 显著降低了模型的求解难度, 下面对上述简化过程的有效性进行分析。

定义 1 $f^* \in F$, 如果不存在 $f \in F$, 使得不等式 $E_{re}(f^*) \leq E_{re}(f)$, $\sigma_{re}^2(f^*) \geq \sigma_{re}^2(f)$ 同时成立, 称 f^* 是优化问题的有效解。

定义 2 设优化问题的两个目标函数 $E_{re}(f)$, $\sigma_{re}^2(f)$ 分别在约束条件下的最优解为 f_1^* , f_2^* , 此时对应的目标函数值为 $E_{re\max}$, $\sigma_{re\min}^2$, 则 $(E_{re\max}, \sigma_{re\min}^2)$

是此优化问题的理想点。如果 $f_1^* = f_2^*$, 则令 $f^* = f_1^*$, f^* 就是优化问题的绝对最优解。

定理 1 经权衡评价函数整合后的单目标简化模型(式(9))的最优解是原多目标能效优化模型(式(1)–式(5))的有效解。

证明 若存在 $f, \bar{f} \in F$ 且 $E_{re}(\bar{f}) \geq E_{re}(f)$, $\sigma_{re}^2(\bar{f}) \leq \sigma_{re}^2(f)$, 由式(7)和式(8)可知 $w_1(\bar{f}) \leq w_1(f)$, $w_2(\bar{f}) \leq w_2(f)$ 时, 则根据式(8)可得下面不等式成立:

$$w(\bar{f}) \leq w(f) \quad (10)$$

假设 \bar{f} 是问题式(9)的解, 但 \bar{f} 不是原优化问题的有效解, 则根据定义 2 可知, 存在 $f \in F$ 使得 $E_{re}(f) \geq E_{re}(\bar{f})$, $\sigma_{re}^2(f) \leq \sigma_{re}^2(\bar{f})$, 即 $w_1(f) \leq w_1(\bar{f})$, $w_2(f) \leq w_2(\bar{f})$ 成立, 由于 $w(f) = c_1 \cdot w_1(f) + c_2 \cdot w_2(f)$, 因此 $w(f) \leq w(\bar{f})$, 显然与式(10)矛盾, 假设不成立。所以, 经权衡评价函数整合后的单目标简化模型的最优解是原多目标能效优化模型的有效解。证毕

至此, 借助权衡评价函数已把难以直接进行求解的多目标优化问题转化为单目标优化问题, 降低了求解过程的难度, 并且证明了经权衡评价函数整合后的单目标简化模型的最优解就是原多目标能效优化问题的有效解, 保证了简化过程的有效性。

2.2 模型求解

经权衡评价函数简化后的模型是一个非线性约束优化模型, 针对该模型, 本节基于序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)理论设计了一种符合传感器节点计算能力的求解算法, 实现了模型的求解。为便于书写, 将如式(9)所示的模型抽象为

$$\left. \begin{aligned} \min w(f) \\ \text{s.t. } h_i(f) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ g_j(f) &\leq 0, \quad j = m+1, m+2, \dots, n \end{aligned} \right\} (11)$$

其中 $h_i(f)$ 和 $g_j(f)$ 分别为权衡评价函数、关于流量策略集合 f 中各段链路流量 f_{ij}^{rk} 的等式约束和不等式约束, 则该问题的 Langrange 函数可表示为

$$L(f, \lambda) = w(f) + \sum_{i=1}^m \lambda_i h_i(f) + \sum_{j=m+1}^n \lambda_j g_j(f) \quad (12)$$

式中 λ_i, λ_j 为 Langrange 乘子。

模型求解的具体实现过程分如下 5 个步骤:

步骤 1 初始化。初始化各条链路的流量为 f_0 , 记迭代次数 $k=0$ 。

步骤 2 寻找本次搜索的可行方向 d_k 。求解二次规划子问题:

$$\left. \begin{aligned} \min \frac{1}{2} d_k^T H_k d_k + \nabla w^T(f_k) d_k \\ \text{s.t. } (\nabla h_i^T(f_k)) d_k + h_i(f_k) &= 0 \\ (\nabla g_j^T(f_k)) d_k + g_j(f_k) &= 0 \end{aligned} \right\} (13)$$

其中 d_k 为搜索方向, $\nabla w(f_k)$, $\nabla h_i(f_k)$, $\nabla g_j(f_k)$ 分别表示函数 $w(f)$, $h_i(f)$ 和 $g_j(f)$ 在点 f_k 处的梯度, 矩阵 \mathbf{H}_k 为原问题的 Lagrange 函数 Hessian 阵的拟牛顿近似矩阵。

$$\mathbf{H}_k \approx \nabla_f^2 L(f_k, \lambda_k) \quad (14)$$

步骤 3 确定本次搜索最优步长 t_k 。通过线性搜索确定最优迭代步长 t_k , t_k 的每次取值必须保证指标函数有足够的下降量:

$$\varphi(f) = w(f) + \sum_{i=1}^m r_i h_i(f) + \sum_{j=m+1}^n r_j \max\{0, g_j(f)\} \quad (15)$$

式中 $r_i = (r_{i+1})_i = \max\{\lambda_i [(r_i)_i + \lambda_i] / 2\}$, $i=1, 2, \dots, m$ 。

步骤 4 迭代更新数据流量。 $f_{k+1} = f_k + t_k d_k$ 。

步骤 5 判断终止条件。检查 $|w_i^{k+1} - w_i^k| \leq \varepsilon$, ε 为迭代精度。若满足终止条件, 则停止; 否则, 令 $k=k+1$, 转入步骤 2, 并按如下规则更新 Hessian 阵:

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T \delta_k} - \frac{\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k}{\delta_k^T \mathbf{H}_k \delta_k} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta_k &= f_{k+1} - f_k \\ q_k &= \nabla w(f_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla h_i(f_{k+1}) + \sum_{j=m+1}^n \lambda_j \nabla g_j(f_{k+1}) \\ &\quad - \left[\nabla w(f_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla h_i(f_k) + \sum_{j=m+1}^n \lambda_j \nabla g_j(f_k) \right] \end{aligned}$$

3 多径流量分配路由(MFAR)算法

多径流量分配路由(MFAR)算法需要 WSNs 满足下列假设条件: (1)所有节点在网络中具有唯一的 id 标识; (2)所有节点的发射功率都是一定的, 所广播的消息只能被一部分节点侦听到; (3)除基站外的普通节点硬件简单, 不具备 GPS 装置; (4)节点都具有一定的存储空间和简单的四则计算能力; (5)节点能够随时检测自身的剩余能量情况。在上述前提下, MFAR 可分为信息交换、路径统计和流量分配 3 个阶段, 下面具体阐述。

阶段 1 信息交换阶段 该阶段, 各传感器节点通过信息交换的方式发现下一跳邻居节点, 并构建邻居信息列表。

网络中的任意节点 i 都维护一个自身信息的列表 $\text{list}(i)$, 列表的表头格式如表 1 所示。

表 1 任意节点 i 的自身信息列表 $\text{list}(i)$ 的表头格式

id(i)	hop(i)	$E_{re}(i)$	nn(i)
-----------	------------	-------------	-----------

表一中 id(i) 是节点 i 在网络中的标识, hop(i) 为节点 i 到达 sink 节点的最小跳数, $E_{re}(i)$ 代表节点 i

当前的剩余能量, nn(i) 表示节点 i 的下一跳邻居节点列表, 包括节点 i 的所有下一跳邻居节点的 id 和下一跳邻居节点到达 sink 节点的最小跳数 hop。

由 sink 节点发起邻居节点发现(Neighbor Node Discover, NND)消息广播, NND 消息中包含 sink 节点自身的 id(s) 和到达 sink 节点的最小跳数标记 hop(s); 默认 id(s)=0, hop(s)=0 而其余节点的 hop 为无穷大。任意节点 a 收到 sink 的 NND 后, 修改自身 hop(a) = hop(s) + 1, 并将 sink 节点的 id 和 hop 加入到自己的下一跳邻居节点列表中, 继续广播包含自身 id 和 hop 的 NND 消息。任意节点 j 收到来自任意非 sink 节点 k 的 NND 消息后, 按如下过程进行处理。

情况 1 若 hop(k) > hop(j), 则丢弃该包;

情况 2 若 hop(k) ≤ hop(j), 且 nn(j) 中不包含节点 k , 则添加 k 的信息到 nn(j), 修改 hop(j) = min(hop(j), hop(k) + 1), 删除 nn(j) 中跳数大于 hop(j) 的节点信息, 广播包含 id(j) 和 hop(j) 的 NND 消息;

情况 3 若 hop(k) ≤ hop(j), 且 nn(j) 中包含节点 k , 选择此时收到的信息包中的 hop(k) 和 nn(j) 中存储的 hop(k) 中较小的一个值作为 hop(k) 存储在 nn(j) 中, 并修改 hop(j) = min(hop(j), hop(k) + 1), 删除 nn(j) 中跳数大于 hop(k) 的节点信息, 广播包含 id(j) 和 hop(j) 的 NND 消息。

信息交换阶段结束以后, 网络中的所有节点都确定了自身到达 sink 节点的最小跳数, 并且依据最小跳数确定了节点的所有下一跳邻居节点。

阶段 2 多路径统计阶段 该阶段, sink 节点依据网络中各传感器节点的信息列表确定源节点到 sink 节点的所有可用路径。

由源节点发送路径发现 Discovery(path, E_{re}) 消息广播, 消息中包含源节点的 id 标识和剩余能量 E_{re} 情况, 该消息依据节点信息列表中的下一跳邻居节点项依次进行转发; 收到消息的节点将自己的 id 号和剩余能量信息分别添加到 path 和 E_{re} 中, 再根据同样的原则继续转发此消息, 直至该消息到达 sink 节点为止。sink 节点通过记录 Discovery 消息包中的 path 信息, 即可统计出源节点到 sink 节点所有可用路径。

阶段 3 流量分配阶段 该阶段是算法的核心部分, sink 节点依据源节点到其的所有可用路径上各节点的剩余能量信息, 确定各链路的转发的流量比例。

sink 节点依据 Discovery 消息包中的 E_{re} 项, 按照 2.2 节中模型求解的 5 个具体步骤, 合理分配所有可用路径上的各链路流量, 并将流量分配的结果以

消息形式进行广播。此阶段结束后，传感器网络得到了源节点到 sink 节点的所有可用路径上的各链路应转发的流量比例，这样在进行数据传输时多条路径就能够通过合理的分工协作，最大程度地利用网络资源，实现传输能耗和网络能耗均衡特性的同时优化。

4 仿真实验与性能评价

MFAR 算法以减小传输能耗、均衡网络能耗为主要目标，通过多路径流量配置实现上述功能。考虑到能量感知多路径 EAR 算法^[15]与 MFAR 算法具有相同的设计目标，并且都是采用多路径结构进行实现，但 EAR 算法依据概率方式在每一轮数据传输过程中选择不同路径来均衡网络能耗，具有一定的随机性和不确定性。为了说明并行多路径流量配置思想的引入对网络能效的影响及所建立的能效优化多径路由模型的有效性，下面就以 EAR 算法为 MFAR 算法的比较对象，在 Matlab 环境下进行仿真实验研究。

为了验证本文提出的多径流量分配路由算法的有效性，本节用一个小规模网络的例子进行仿真实验。网络结构如图 1 所示：

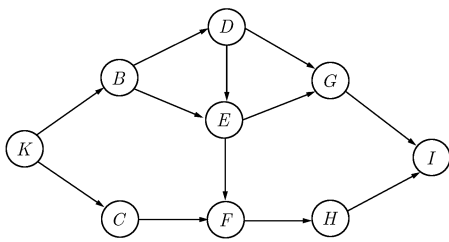


图 1 网络拓扑结构

其中节点 K 为数据采集节点，节点 I 为 sink 节点，其他节点作为转发节点，假设各节点的初始能量都为 5 J，各节点间距离如表 2 所示。

仿真过程中，不考虑节点竞争信道、数据分组出错、信令传递、计算机数据融合、超时重发等能耗，仅考虑无线通信能耗。数据传输采用经典能耗模型，当节点成功传输 1 bit 数据时，传输能量可定义为 $E_{TX} = E_{ele} + E_{amp}$ ，其中 E_{ele} 为发射电路消耗的能量，其大小为 50 nJ/bit， E_{amp} 为发送放大器消耗的能量，其大小为 $E_{amp} = \varepsilon \cdot d_{ij}^\alpha$ ，它与无线电传播方

式有关。设 d_{ij} 为节点 i 到节点 j 间的距离， $d_{th} = 75$ m 为区分信道模型和信道模型的距离门限，规定：当 $d_{ij} \leq d_{th}$ 时，对应自由空间信道模型， $\varepsilon = 10$ pJ/bit/m²， $\alpha = 2$ ；当 $d_{ij} > d_{th}$ 时，对应多径衰落信道模型， $\varepsilon = 0.0013$ pJ/bit/m⁴， $\alpha = 4$ 。当节点成功接收 1 bit 数据时，消耗的能量定义为 $E_{RX} = E_{ele}$ 。对于图 1 所示网络，仿真假设每轮数据传输都由源节点 K 发送 1000 bit 的数据到目标节点 I，分别执行 MFAR 算法和 EAR 算法各 10 轮，并且设置权衡评价函数中的权衡系数为 $c_1 = c_2 = 0.5$ ，统计得到网络剩余能量和剩余能量方差分别如下图 2 和表 3 所示。

4.1 网络传输能耗比较

本文采用全网节点总剩余能量作为网络能耗的度量，总剩余能量越大，说明采用这种算法建立的路由在数据传输过程中消耗的能量越少，也就是说这种路由算法在保证传输能耗方面具有相对较好的特性；反之，总剩余能量越小，说明这种路由算法在数据传输过程中消耗的能量较大，不利于节省网络能量。

图 2 反映了分别采用 MFAR 算法和 EAR 算法建立的路由对数据传输过程中能量消耗的影响。观察图 2 可知，随着传输数据量的增加，采用两种算法建立的路由进行数据传输，网络的总剩余能量都呈现逐渐减少的趋势。虽然采用两种算法建立路由进行数据传输全网总剩余能量的差距不是很大，但相对比较来说，采用 MFAR 算法建立路由进行数据传输消耗的能量始终要小于采用 EAR 算法。可见，MFAR 算法采用的多目标能效优化模型中的最大化全网总剩余能量这个优化项起到了一定的优化作用，能够保证数据传输过程中消耗的能量相对较小，较 EAR 算法以通信代价为依据概率性的选择不同路径来说，能够更加精确、稳定的保证网络传输能耗特性。

4.2 网络能耗均衡性比较

由于 WSNs 一般部署在广阔的监测区域内，各节点通过相互合作进行数据传输，网络节点剩余能量的方差能够在一定程度上反映能量消耗的均衡程度。如果剩余能量方差越大，说明网络中节点的剩余能量多少的差异性越大，网络能耗越不均衡，部分剩余能量小的节点可能很快成为网络“瓶颈”，导

表 2 网络各节点间距离

链路	K-B	K-C	B-D	B-E	C-F	D-E	E-F	D-G	E-G	F-H	G-I	H-I
距离(m)	7	7	5.8	5.8	5	6	7	5.8	5.8	5	7	7

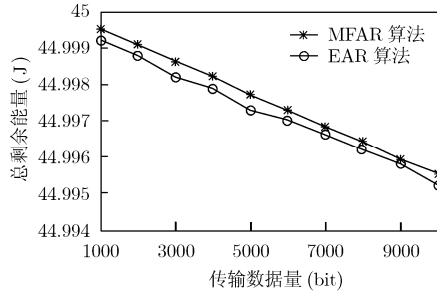


图 2 网络总剩余能量对比

致网络提前死亡；剩余能量方差越小，网络的能耗均衡越均衡，从而有利于提高网络能量效率，最大化网络生命期。

由表 3 中数据可知，随着传输数据量的增加，两种算法建立的路由的剩余能量方差都呈现增大的趋势。但采用 MFAR 算法建立的路由进行数据传输，网络剩余能量的方差大小的数量级主要集中在 10^{-12} ，远远低于 EAR 算法的 10^{-9} 。这是由于 MFAR 算法在每轮数据传输过程中都引入了合理配置源节点到 sink 节点的所有可用路径的流量以均衡网络能耗的思想；而 EAR 协议则是在每轮数据传输之间依据通信代价概率性的选择不同路径来实现网络能耗的均衡，具有一定的随机性和不确定性，很可能导致通信代价较低的链路多次被选择进行数据传输，而成为网络“瓶颈”，影响网络能效及寿命。由此可见，MFAR 算法较 EAR 算法在能耗均衡特性方面具有明显优势。

4.3 网络能效综合比较

如前文所述，一个好的路由算法不仅要求网络

传输能耗要尽可能小，同时也要求能耗分布要均衡，这两个方面缺一不可。为了更加直观地综合比较 MFAR 算法和 EAR 算法的能效特性，分别连续执行 MFAR 算法和 EAR 算法各 100 轮，统计网络中所有节点的剩余能量分布情况，结果分别如图 3 所示。

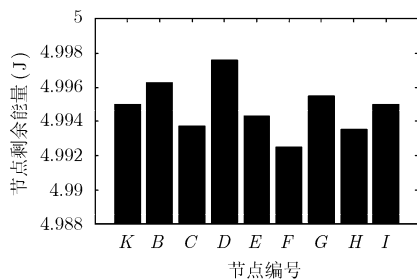
对比图 3(a)和图 3(b)易知，执行 MFAR 算法 100 轮过后，网络中所有节点的剩余能量分布情况要明显优于执行 EAR 算法，尤其是在能耗均衡方面。这说明本文设计的多目标能效优化模型及基于此模型的多径流量分配路由算法是可行且有效的，其能够合理配置各链路流量，并且这种流量分配策略能够在尽量减小网络传输能耗的同时使能耗分布更加均衡，保证各节点的剩余能量基本保持一致，这样就可以有效避免“瓶颈”节点的出现，从而大大提高网络能量效率，延长网络生命期。

5 结论

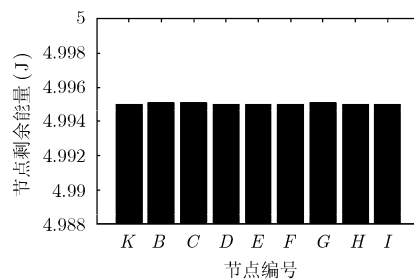
为最大限度利用网络能量资源，延长网络生命期，本文兼顾网络传输能耗和能耗均衡特性，建立多目标能效优化模型；并基于该模型设计了一种多径流量分配路由算法 MFAR，本算法是利用源节点到目的节点间的多条路径上的流量的合理协调与分配来实现网络能效的优化。仿真实验表明，本文提出的 MFAR 算法不仅在网络总剩余能量上较 EAR 算法具有优势，剩余能量的方差与 EAR 算法相比更是减小了 3 个数量级，显著提高了网络能量利用率，达到了在降低网络传输能耗的同时保证能耗均衡的目标。

表 3 剩余能量方差对比

数据量(bit)	1000	2000	3000	4000	5000
MFAR 算法	1.393×10^{-13}	5.574×10^{-13}	1.254×10^{-12}	2.223×10^{-12}	3.483×10^{-12}
EAR 算法	3.928×10^{-9}	2.993×10^{-9}	5.041×10^{-9}	2.996×10^{-9}	5.041×10^{-9}
数据量(bit)	6000	7000	8000	9000	10000
MFAR 算法	5.016×10^{-12}	6.828×10^{-12}	8.918×10^{-12}	1.128×10^{-11}	1.331×10^{-11}
EAR 算法	7.461×10^{-9}	1.485×10^{-8}	1.045×10^{-8}	1.883×10^{-8}	2.723×10^{-8}



(a) 执行 EAR 算法



(b) 执行 MFAR 算法

图 3 100 轮后各节点剩余能量对比图

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramanian Y, and Cayirici E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102–114.
- [2] Kim Hwangnam, Park Eun-chan, and Lee Suk-kyu, *et al.* Fast performance assessment of IEEE 802.11-based wireless networks. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 53(11/12): 2173–2191.
- [3] Yick J, Mukherjee B, and Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292–2330.
- [4] Giuseppe A, Marco C, and Mario D F, *et al.* Energy conservation in wireless sensor networks: a survey. *Ad hoc Networks*, 2009, 7(3): 537–568.
- [5] Dietrich I and Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, 5(1): 1–38.
- [6] Tavli B, Kayaalp M, and Ceylan O, *et al.* Data processing and communication strategies for lifetime optimization in wireless sensor networks. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2010, 64(10): 992–998.
- [7] Uster H and Lin Hui. Integrated topology control and routing in wireless sensor networks for prolonged network lifetime. *Ad hoc Networks*, 2011, 9(5): 835–851.
- [8] Ben-Othman J and Yahya B. Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2010, 70(8): 849–857.
- [9] Kandris D, Tsagkaropoulos M, and Politis I, *et al.* Energy efficient and perceived QoS aware video routing over wireless multimedia sensor networks. *Ad hoc Networks*, 2011, 9(4): 591–607.
- [10] Ye F, Chen A, and Lu S, *et al.* A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks. Proc. of the 10th Int'l Conference on Computer Communications and Networks, Arizona: IEEE Communications Society, Scottsdale, AZ, USA, 2001: 304–309.
- [11] Han K H, Ko Y B, and Kim J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks. Vehicular Technology Conference, Los Angeles CA, 2004: 2979–2983.
- [12] Toh C K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless Ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(6): 138–147.
- [13] Mainwaring A, Polastre J, and Szewczyk R, *et al.* Wireless sensor networks for habitat monitoring. Proc of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, ACM Press, 2002: 88–97.
- [14] Gagarin A, Hussain S, and Yang L T. Distributed hierarchical search for balanced energy consumption routing spanning trees in wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2010, 70(9): 975–982.
- [15] Shah R and Rabaey J. Energy aware routing for low energy Ad hoc sensor networks. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Orlando: IEEE Communications Society, March 17–21, 2002: 350–355.
- [16] Chang J H and Tassiulas L. Routing for maximum system lifetime in wireless Ad-hoc networks. Proc. of 37th Annual Conference on Communication, Control, and Computing, Monticello, IL, Sept. 1999: 1–10.
- [17] Chang J H and Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(4): 609–619.
- [18] 赵彤, 郭田德, 杨文国. 无线传感器网络能耗均衡路由模型及算法. *软件学报*, 2009, 20(11): 3023–3033.
- Zhao Tong, Guo Tian-de, and Yang Wen-guo. Energy balancing routing model and its algorithm in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2009, 20(11): 3023–3033.
- 郝晓辰: 男, 1980年生, 副教授, 博士, 研究方向为无线传感器网络关键技术.
- 贾楠: 女, 1986年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器的分簇拓扑控制算法与协议.
- 刘彬: 男, 1953年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能传感器设计和无线传感网络.