

# 基于能耗均衡的无线传感器路由算法

苏圣超<sup>1,2</sup> 赵曙光<sup>1</sup>

(东华大学信息科学与技术学院 上海 201620)<sup>1</sup> (上海工程技术大学工程实训中心 上海 201620)<sup>2</sup>

**摘要** 为了延长无线传感器的使用寿命,弥补传统路由算法的不足,提出一种基于能耗均衡的无线传感器路由算法。首先,分析了无线传感器节点能量的消耗过程,建立了源节点到目的节点的路由表;然后,通过单跳消息方式确定每一个传感器节点的相邻节点,并把剩余能量信息传递给其相邻节点;最后,根据蚁群算法中的信息素浓度与局部能量来选择无线传感器传输数据时的下一跳节点。通过具体实验对其性能进行了测试,实验结果表明,该算法能耗低,保证了能耗均衡,最大程度地延长了传感器节点的寿命。

**关键词** 能量,均衡,无线传感器,路由

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.021

## Wireless Sensor Routing Algorithm Based on Energy Balance

SU Sheng-chao<sup>1,2</sup> ZHAO Shu-guang<sup>1</sup>

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)<sup>1</sup>

(Engineering Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to improve the service life of wireless sensor and make up for the shortcomings of traditional routing algorithms, a wireless sensor routing algorithm based on energy balance was proposed. Firstly, the energy consumption process of wireless sensor node is analyzed, and the routing table from source node to destination node is built. Secondly, all nodes need to jump through a single message to determine its adjacent nodes, and the remaining energy information will be delivered to its adjacent nodes. Finally, according to the concentration of pheromone in ant-colony algorithm and local energy, the next hop node of transmitting data for wireless sensor is selected. The experimental results show that the proposed algorithm has low energy consumption, ensures energy consumption balance, and extends the lifetime of wireless sensor nodes.

**Keywords** Energy, Equalization, Wireless sensor, Routing

## 1 引言

无线传感器节点通常被安装于较恶劣的环境中,因为传感器节点能量有限,且通常情况下无法更换电池或进行充电,因此传感器节点在能量完全耗尽后将死亡<sup>[1]</sup>。在死亡节点比例高于一定值后,无线传感网络将停止工作。因此,设计一种能耗均衡的传感网络路由算法,以延长无线传感器的使用寿命,成为目前无线传感领域中的重要研究课题<sup>[2-3]</sup>。

目前存在许多性能较好的无线传感器路由算法,如张春花等<sup>[4]</sup>提出了定时观念的节点能量控制方法,但是该方法以经验时间为约束条件,缺少严谨性。孙毅等<sup>[5]</sup>提出了簇的能耗均衡的概念,但是仅以固定簇为单位,缺少整体网络概念,限制了其应用。孙想等<sup>[6]</sup>以遗传算法为基础设计网络路由,但是该方法很容易陷入局部最小中。文献<sup>[7]</sup>中的方法过于强调拓扑关系的稳定,也同样限制了其应用。

为了延长无线传感器的使用寿命,保持能耗均衡,本文提

出一种能耗均衡的无线传感器网络节点路由算法,并通过仿真实验对其性能进行测试。结果表明,该算法不仅增加了无线网络能量的利用率,而且延长了传感器的使用时间。

## 2 无线传感器能量消耗模型

无线传感器节点能量消耗模型如图 1 所示。

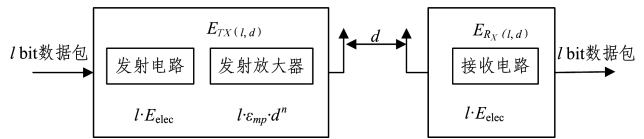


图 1 能量消耗模型

Fig. 1 Energy consumption model

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} l \times E_{elec} + l \epsilon_{fs} d^2, & d < d_0 \\ l \times E_{elec} + l \epsilon_{mp} d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}}$ 。

节点接收  $l$  bit 信息所需的能耗如下:

$$E_{R_X}(l) = l \times E_{\text{elec}} \quad (2)$$

簇首在进行数据处理的过程中,处理  $l$  bit 信息所需的能耗如下:

$$E_{da-fs}(l) = l \times E_{DA} \quad (3)$$

### 3 能耗均衡的无线传感器路由算法

#### 3.1 蚁群优化算法

蚁群优化算法是一种用于解决 TSP 问题的算法,在众多复杂问题的优化中都具有很好的应用效果。假设  $G=(V, E)$  为连通无向图,  $V$  用于描述图  $G$  中顶点的集合,  $E$  用于描述边的集合。  $V_i, v_j \in V, e(i, j) \in E$ 。用  $\mu_{ij}$  描述边  $e(i, j)$  上的信息素浓度;用  $\eta_{ij}$  描述边  $e(i, j)$  上预知的局部启发值,该值可描述所有形式的代价。针对顶点  $v_r$  处的蚂蚁,可通过信息浓度  $\mu_{ij}$  与局部启发值  $\eta_{ij}$  求出一相邻顶点  $v_j$  的概率  $p_{ij}$ :

$$p_{ij}(t) = \frac{[\mu_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_k [\mu_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta} \quad (4)$$

其中,  $V_i$  代表全部与顶点  $v_i$  相距一步的相邻顶点集合;  $\alpha, \beta$  分别用于描述  $\mu_{ij}$  与  $\eta_{ij}$  的可调权重;  $t$  用于描述时刻。因此,蚂蚁路由更倾向于通过选择  $\alpha$  与  $\beta$  值完成调整。若  $\alpha > \beta$ , 则代表蚂蚁会选择信息素浓度高的路径;否则蚂蚁会选择优化启发值更高的路径。

在蚂蚁从  $v_i$  经  $e(i, j)$  到  $v_j$  时,  $e(i, j)$  中的信息素浓度  $\mu_{ij}$  可通过式(5)调整:

$$\mu_{ij}(t) = \mu_{ij}(t) + \Delta\mu \quad (5)$$

其中,  $\Delta\mu$  用于描述蚂蚁保存的信息素量。随着时间的推移,  $e(i, j)$  中的信息素浓度会按照式(6)蒸发:

$$\mu_{ij}(t+\tau) = \mu_{ij}(t) \times \rho \quad (6)$$

其中,  $\tau$  用于描述蒸发时间间隔;  $\rho$  用于描述蒸发系数。

#### 3.2 能耗均衡的无线传感器路由算法的具体设计

##### 3.2.1 初始化及路由路径的搜寻

在进行初始化时,需要找到全部从源节点至目的节点的有效路径,同时在路径搜索时构建路由表<sup>[8-9]</sup>。在路径搜寻前,所有节点首先需通过一个单跳消息确定其相邻节点,同时把剩余能量信息传递给其相邻节点<sup>[10]</sup>。无线传感器中所有节点均有一个路由表,其结构如表1所列。

表1 节点  $v_i$  的路由表

Table 1 Routing table for node  $v_i$

邻居节点	信息浓度	剩余能量
$v_j$	$\mu_{ij}$	$\eta_j$
$v_k$	$\mu_{ik}$	$\eta_k$
...	...	...

从目的节点  $v_d$  向源节点  $v_s$  搜寻路径,详细过程如下:

1) 从  $v_d$  中派出一个路径搜寻蚂蚁  $A_s$ , 通过广播的形式令其在无线传感器中扩散。蚂蚁  $A_s$  中含有节点地址  $v_i$ 、源节点地址  $v_s$  以及跳数等信息。其处于目的节点时,  $v_i = v_d$ , 跳数为 0。

2) 在中间节点  $v_j$  接收到相邻节点  $v_i$  的蚂蚁  $A_s$  后, 首先对其是否接收到  $A_s$  进行判断, 若未接收到, 则将跳数增加 1, 同时在本地图路由表中塑造一个表项, 记录  $v_r$  及与跳数有关的

信息素浓度<sup>[11]</sup>; 若  $v_j$  接收到  $A_s$ , 则认为  $v_j$  已经转发蚂蚁  $A_s$ , 将其删除, 以防止消息循环与冗余传输, 并用  $v_j$  代替蚂蚁  $A_s$  中的  $v_i$ , 同时转发蚂蚁  $A_s$  至其相邻节点。

3) 循环步骤 2), 直到蚂蚁  $A_s$  抵达源节点  $v_s$ 。

通过以上初始化过程和路径搜寻过程塑造从  $v_i$  至  $v_d$  的全部有效路径及不同节点的初始信息素值<sup>[12]</sup>; 同时, 为不同节点构建数据传输路由表。

在本文所提算法中, 节点  $v_i$  到相邻节点  $v_j$  的信息素浓度将直接受到搜寻蚂蚁跳数的影响, 即:

$$\mu_{ij} = 1 - \frac{h_{ij}}{\sum_k h_{ik}} \quad (7)$$

其中,  $h_{ij}, h_{ik}$  用于描述路径搜寻过程中的跳数。

对节点  $v_i$  的剩余能量  $\eta_j$  进行归一化处理:

$$\eta_j = \frac{E_i^{\text{remaining}}}{E_i^{\text{initial}}} \quad (8)$$

其中,  $E_i^{\text{remaining}}$  用于描述节点  $v_i$  的剩余能量;  $E_i^{\text{initial}}$  用于描述节点  $v_i$  的初始能量。

##### 3.2.2 最佳数据传输路径的选择

通过无线传感器传输的数据, 依据信息素浓度与局部能量选择下一跳节点。针对节点  $v_i$  的数据包, 可通过式(4)求出选择下一跳节点  $v_j$  的概率, 其中,  $\mu_{ij}$  取路由表中节点  $v_i$  到邻居节点  $v_j$  的信息浓度, 通过式(5)求出; 局部启发值  $\eta_j$  取路由表中节点  $v_i$  的邻居节点  $v_j$  的归一化剩余能量, 通过式(8)求出。

##### 3.2.3 基于能耗均衡的路由更新

通过源数据节点簇首  $s_i$  将数据传输至目的节点后, 对发送数据的转发时延进行统计, 通过后向蚂蚁得到路径中的最小剩余能量、路径平均能耗以及目的节点之间的跳数, 并对簇头  $s_j$  的信息浓度进行更新。信息素的增强可通过式(9)实现, 路由更新计算公式如式(10)所示,  $s_j$  节点信息素更新公式如式(11)所示。

$$\mu_{ij}(t) = \sum \mu_{ij}^k \quad (9)$$

$$\mu_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \mu_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\mu_{ij} \quad (10)$$

$$\mu_{ij}^k = Q \cdot \frac{E_{\min}^k}{C_{\text{hop}}^k E_{\text{ave}}} \quad (11)$$

其中,  $C_{\text{hop}}^k$  用于描述此刻节点  $i$  抵达目的节点的跳数;  $E_{\min}^k$  用于描述后向蚂蚁经过的全部节点中的最小节点能量值;  $E_{\text{ave}}$  用于描述源节点与目的节点之间所消耗的平均能量。

## 4 仿真实验

### 4.1 实验环境

为了验证所提算法的有效性, 本文进行了仿真实验, 将其与遗传算法、神经网络方法进行对比。实验相关参数如表2所列。

表2 实验相关参数

Table 2 Correlation parameters of experiment

参数	取值	参数	取值
覆盖范围/m	120×120	节点个数/个	500~1000
$E_{\text{elec}}/(\text{nJ/bit})$	62	节点初始能量/J	0.6
$P/\text{bits}$	0.5	数据包大小	4200
$E_{DF}/(\text{nJ/bit})$	6	$\epsilon_{fs}/(\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2))$	12

## 4.2 结果与分析

### 4.2.1 生命周期比较

生命周期即无线传感器工作开始到第一个节点能量耗尽的时间。图 2 给出了本文算法、遗传算法和神经网络的生命周期的比较结果。从图中可以看出,遗传算法的第一个死亡节点出现在 300 轮左右,神经网络的第一个死亡节点出现在 700 轮左右,而本文算法的第一个死亡节点出现在 850 轮左右,说明在本文算法下无线传感器的生命周期更长。这主要是因为本文算法能够使能量均匀地划分给不同节点,避免了某一节点由于能耗过多而提前死亡。

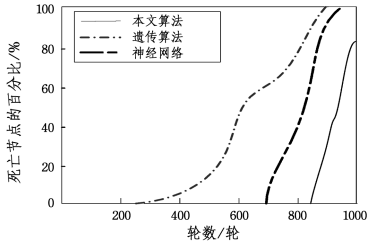


图 2 死亡节点数量比较

Fig. 2 Comparison of number of dead nodes

在测试的过程中,根据无线传感器传输的数据包数量来间接衡量传感器的使用寿命。图 3 给出了能量初始方差一致的情况下 3 种算法的最大发包数量。分析图 3 可知,在初始能量方差一致的情况下,本文算法的最大发包数量明显更高;在初始能量方差逐渐增加的情况下,3 种算法的使用寿命都逐渐降低,这是由于随着能量标准方差的逐渐增加,节点能量分布的均匀性越来越差,若能量较小的节点承担较大的负载,则其很容易停止运行,导致无线传感器的使用寿命缩短。本文算法的使用寿命最长,说明其可以有效地均衡能量,延长整个无线传感器的寿命。

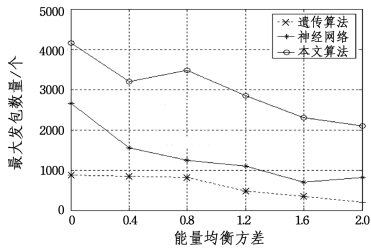


图 3 最大发包数量的比较

Fig. 3 Comparison of maximum contract quantity

### 4.2.2 负载均衡分析

在路由算法中,所有簇的负载均衡性体现在节点分配的均匀性与能耗均匀性上。负载均衡因子为:

$$LBF = \frac{CH\_num}{\sum_{i=1}^{CH\_num} (X_i - \mu)^2} \quad (12)$$

其中,  $CH\_num$  用于描述簇的数量;  $X_i$  用于描述第  $i$  个簇中的成员数量;  $\mu$  用于描述所有簇的平均成员数量,其计算公式为:

$$\mu = \frac{N - CH\_num}{CH\_num} \quad (13)$$

$LBF$  值越大,则簇的负载越均衡,无线传感器的负载越

均衡。相同条件下 3 种算法的负载均衡因子结果如图 4 所示。由图中可知,在本文算法出现死亡节点(第 850 轮)前,本文算法的负载均衡因子高于遗传算法和神经网络,这主要是因为本文算法的能耗更加均衡,在出现死亡节点前,其负载均衡因子处于固定值,在负载均衡方面具有明显的优势。

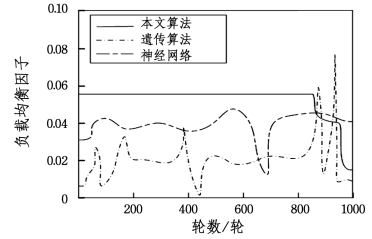


图 4 负载均衡因子的对比

Fig. 4 Comparison of load balancing factors

### 4.2.3 能耗分析

能耗是衡量无线传感路由算法的关键指标,在传输数据包数为 1000 时,3 种算法的能量消耗情况如图 5 所示。可以看出,在网络节点逐渐增加的情况下,本文算法、遗传算法和神经网络的能耗均有所升高,这是由于传感器节点越多,无线传感器密度越大,传输数据包越多,从而增加了能耗;在节点数量一致的状态下,本文算法消耗的能量更低,这表明本文算法可以更有效地利用资源,能量的整体利用率更高。

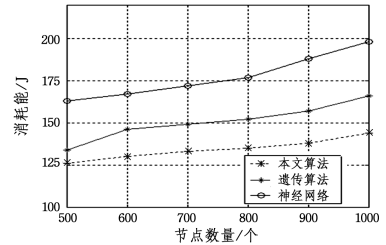


图 5 能量消耗的比较

Fig. 5 Comparison of energy consumption

能耗均衡性也是衡量无线传感器路由算法有效性的关键指标之一。若无线传感器中所有节点的能量消耗均衡,其将不会因为局部节点的能耗过早耗尽而使整体无线传感器网络停止运行。节点的能耗均衡性通过节点能量的方差  $E_{var}$  进行评价,  $E_{var}$  反映了节点剩余能量的分布状态,其值越小,表示能量分布越均衡,整体性能越佳。  $E_{var}$  的计算公式如下:

$$E_{var} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i(t) - E_{ave}(t))^2}{n}} \quad (14)$$

$$E_i(t) = \{e_i(t) | e_i(t) = e_c(t) - e_{con,i}(t)\} \quad (15)$$

$$E_{ave}(t) = \sum_{i=1}^n E_i(t) / n \quad (16)$$

其中,  $e_c(t)$  用于描述节点  $n_i$  的初始能量;  $e_{con,i}(t)$  用于描述节点  $n_i$  在  $t$  时间段内所消耗的能量;  $e_i(t)$  用于描述节点  $n_i$  在  $t$  时刻的剩余能量。

能量标准方差的比较结果如图 6 所示。可以看出,神经网络和遗传算法的能量方差高于本文算法,说明对比算法无法有效均衡能量消耗,而本文算法的能量方差较小,能量方差曲线较为平稳。随着节点数量的逐渐增加,3 种算法的能量方差均有下降趋势,这主要是由于当前无线传感器的密度增加,

选择余地更大,使得方差降低;但本文算法的能量方差的下降趋势最小,说明本文算法的能耗均衡性得到了显著的改善。

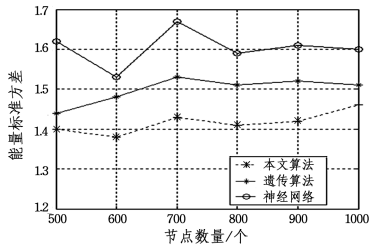


图6 能量标准方差的比较

Fig. 6 Comparison of energy standard deviation

#### 4.2.4 时延测试

经800次路由实验,对3种算法的平均跳数进行比较,平均跳数越低,则时延越低。3种算法的平均跳数比较结果如图7所示。分析可知,随着节点数目的不断增多,曲线呈递增趋势;当节点数均增加至900时,网络时延增加得较为明显。而本文算法的平均跳数曲线与两种对比算法的差异不明显,这主要是因为本文算法在对下一跳节点进行选择时,综合分析了各种因素,效率优势不明显,但依然表现出了较好的性能。

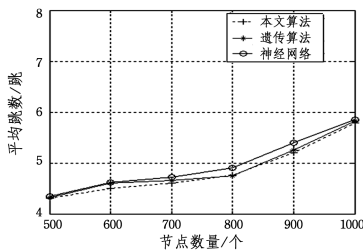


图7 时延比较

Fig. 7 Comparison of time delay

**结束语** 为了提高传感器节点能量的利用率,提出了基于能耗均衡的无线传感器路由算法,在保证能耗均衡的基础上,基于蚁群算法提出了一种无线传感器路由算法。经实验验证,所提算法能耗低,能耗均衡性好,能延长传感器节点的使用寿命。

## 参考文献

[1] HAN Z, WU J, ZHANG J, et al. A General Self-Organized Tree-Based Energy-Balance Routing Protocol for Wireless Sensor Network[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(2): 732-740.

[2] HE Y L, ZHANG X, GUO H Y, et al. Wireless Sensor Network Energy Balancing Routing Algorithm Based on Game Theory[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(2): 313-317. (in Chinese)

贺云璐, 张新, 郭洪尧, 等. 无线传感器网络能耗均衡路由博弈算法[J]. 半导体光电, 2014, 35(2): 313-317.

[3] DING G M, ZHANG A L, CHEN H, et al. An Energy Balanced Cluster Routing Protocol of Battlefield Wireless Sensor Network[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(6): 91-94. (in Chinese)

丁冠铭, 张安琳, 陈慧, 等. 一种能耗均衡的战场无线传感器网络路由协议算法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(6): 91-94.

[4] ZHANG C H, LIU F A, HOU B Q, et al. Timer-based Unequal

Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(12): 2603-2607. (in Chinese)

张春花, 刘方爱, 侯冰倩, 等. 无线传感器网络中基于定时器的非均匀分簇路由算法[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(12): 2603-2607.

[5] SUN Y, NAN J, WU X, et al. Cluster-based and energy-balanced time synchronization algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(9): 2456-2459. (in Chinese)

孙毅, 南婧, 武昕, 等. 基于簇的能耗均衡无线传感器网络时间同步算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(9): 2456-2459.

[6] SUN X, WU B G, WU H G, et al. Topology Based Energy Efficient Routing Algorithm in Farmland Wireless Sensor Network[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 232-238. (in Chinese)

孙想, 吴保国, 吴华瑞, 等. 能量高效的农田无线传感器网络拓扑关联路由算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 232-238.

[7] LI X, SUN H Z. Algorithm of Wireless Sensor Network Routing Based on Energy Aware[J]. Computer Science, 2016, 43(S1): 291-294. (in Chinese)

李响, 孙华志. 基于能量感知的无线传感器网络路由算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(S1): 291-294.

[8] LIN S J, TONG Y X, WANG X D, et al. An energy-optimization routing algorithm based on security of wireless sensor network[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(2): 193-201. (in Chinese)

李树江, 佟以鑫, 王向东, 等. 一种基于无线传感器网络安全的能量优化路由算法[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(2): 193-201.

[9] ZHU P, WU D L, WU Y J, et al. Routing Algorithms for WSN Based on Fuzzy Clustering and Energy-Balance[J]. Microelectronics & Computer, 2015, 32(12): 31-35. (in Chinese)

朱攀, 吴多龙, 吴艳杰, 等. 基于模糊聚类 and 能耗均衡的 WSN 路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(12): 31-35.

[10] DONG R S, MA Z X, GUO Y C, et al. A Markov Game Theory-Based Energy Balance Routing Algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7): 1500-1508. (in Chinese)

董荣胜, 马争先, 郭云川, 等. 一种基于马尔可夫博弈的能耗均衡路由算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1500-1508.

[11] JIANG C J, SHI W R, TANG X L, et al. Energy-Balanced Unequal Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1222-1232. (in Chinese)

蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能耗均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222-1232.

[12] LI C L, HU C H. A dynamic multi-hop non-uniform clustering routing protocol in wireless sensor networks[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(7): 2048-2053. (in Chinese)

李超良, 胡春华. 无线传感器网络中面向动态多跳的非均匀分簇路由[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7): 2048-2053.

[13] FANG N P. Cross-Layer Energy Balanced Routing Protocol in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2016, 30(10): 122-128. (in Chinese)

房能沛. 无线传感器网络跨层能耗均衡路由协议[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2016, 30(10): 122-128.