

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902689

# 图论在无线传感网络路由协议中的应用研究\*

高梅 王丙元

(中国民航大学 电子信息与自动化学院 天津 300300)

**摘要:**为降低无线传感网络节点能耗,延长网络生存时间,将图论最优选址问题用于分簇路由协议设计。依据节点剩余能量,结合图论的中心论算法进行簇头选举,以降低和平衡簇内能耗。依据下一跳簇头的能量消耗情况,使用Dijkstra算法设计最佳路由,确定最佳跳数,以降低数据传输的通信能耗,均衡全网能量。将此算法用于机场助航单灯监控系统,并与AL-CAME和ECOMP协议进行对比,仿真结果表明,此算法网络开销最小,节点剩余能量值远大于其他两种算法,网络能耗分布更为均衡,有效延长了网络的生命周期。

**关键词:**图论;无线传感器网络;路由协议;助航灯;能量均衡

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Research of graph theory in wireless sensor network routing protocol

Gao Mei Wang Bingyuan

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To reduce the energy consumption of wireless sensor network nodes and prolong the lifetime of the network, the optimal location of graph theory is applied to the clustering routing protocol. In order to reduce and balance the energy consumption in the cluster, the cluster head election is carried out according to the residual energy of the nodes and the center theory algorithm of graph theory. According to the energy of the next hop cluster head, Dijkstra algorithm is used to build the best route and determine the best hop number to save energy consumption of data transmission and balance the whole network energy consumption. The algorithm is applied to the airport single light monitoring system, and the simulation results show that compared with AL-CAME and ECOMP, the algorithm based on graph theory has the least network overhead, the residual energy value is far greater than the other two algorithms, the distribution of network energy consumption is more balanced, and the life cycle of the network is effectively extended.

**Keywords:** graph theory; wireless sensor network; routing protocol; airfield lighting; energy balance

## 0 引言

无线传感网络(wireless sensor network, WSN)电池能量有限,节点的寿命直接影响到无线传感网络的生存周期,所以降低传感节点能耗,延长网络生命周期是目前极为关注的问题。

LEACH协议是最早提出的动态分簇路由算法,在LEACH的基础上又发展了很多分簇路由算法。文献[1]使用蚁群优化算法在簇内建立数据传输路径,实现了簇

内能耗均衡,而没有考虑簇头选举机制及簇间通信路由优化问题,缺少对于全网能耗的均衡。文献[2]基于NSGA-II,引入全网通信距离之和最小、全网能耗最小、簇首节点间能耗标准差最小、簇首能量最大化和网络生存时间5个适应度函数实现簇首选择,但是没有考虑簇间通信路由算法影响簇首能量最大化的情况。文献[3]综合考虑距离因子、剩余能量因子和密度因子,改进了LEACH算法中簇首选举的阈值,使得簇首分布更为均匀,但是没有考虑距离基站较近的簇首节点由于频繁转发数据引发的“热点问题”,导致网络能耗分布不均衡,

收稿日期:2019-10-21 Received Date: 2019-10-21

\* 基金项目:国家自然科学基金(51707195)、中央高校基金(ZXH2012P002)资助项目

进而影响到网络的寿命。文献[4]提出 ECOMP 协议,簇内采用双向环状结构传输数据,每个节点以顺时针方向和逆时针方向交替发送数据到邻居节点,最后传输到簇发送节点,簇发送节点单跳或多跳传输数据到基站,簇头充当路由,接收簇发送节点或其他簇头传来的数据。簇发送节点与簇头分别承担不同的任务,并且依据剩余能量轮换选举产生,在一定程度上实现了簇内能耗均衡。簇内数据传输方向的改变引起数据通信距离的变化,降低了节点能耗,有利于能耗均衡,但是每一个节点都要接收邻居节点的数据,要求每个节点知道其两个相邻节点的位置信息,通信开销较大,而且传输过程中多次进行数据融合也导致耗能较大。文献[5]以降低节点能耗,实现网络能耗均衡为目标,将网络分区,区域内采用动态成簇算法,以轮为工作周期,每轮选举产生新的簇头,在簇头选举过程中,将每个区域存活节点数目和节点剩余能量引入 LEACH 阈值计算公式,为了更有效的使用阈值,缩小了 LEACH 算法中节点的随机数生成范围,其上限值由簇成员节点平均剩余能量水平决定。基于剩余能量的簇头选举机制和分区机制一定程度上实现了能耗均衡,但是节点仅仅依靠接收到的能量情况选择离自身最近的簇头,而没有考虑簇头到基站的距离远近,缺乏对全网消耗能量的平衡,在网络范围变大时,会明显增大网络能量消耗。文献[6]基于无线网络中静态汇聚节点引发的热点问题,提出了 STDD 协议,移动汇聚节点为整个网络提供了负载均衡和能耗均衡,但是汇聚节点的可移动性也带来了一些新的问题,如位置更新频繁,数据包延迟等。文献[7]根据网络所有存活节点到汇聚节点的平均距离以及节点剩余能量来选取簇头及设计路由,考虑了通信阶段的能耗问题,而没有涉及簇内通信能耗问题。文献[8]基于助航灯单灯监控系统提出了 AL-CAME 协议。协议以基站为中心均匀划分簇,以最大剩余能量原则选举产生簇头,但是没有考虑助航灯的实际分布情况,导致每一轮距离簇头较远的节点通信能耗较大,在数据传输阶段采用单跳传输方式,通信方式简单,但是簇头位置会出现远离基站的情况,从而导致通信能耗大,影响到网络的生存周期。

本协议将图论的中心选址算法<sup>[9]</sup>用于选举产生无线网络的簇头,算法中的最短距离矩阵使得簇内各个节点到簇头的距离最短,数据通信代价最小,能够有效减小簇内各成员节点的能量开支。相对于单跳传输,数据传输阶段使用多跳传输方式均衡节点能耗,但是如果不限多跳次数,会导致距离基站近的簇头因为较多的参与数据转发而引起能量消耗过快,存在严重的“热点问题”<sup>[10]</sup>。本协议使用图论中的 Dijkstra 算法<sup>[11-13]</sup>用于路由设计,以通信能耗为权重,优化选择通信路由,减小节点能量开销<sup>[14]</sup>,采取多跳传输通信策略,依据下一跳簇

头的剩余能量及能量消耗情况,确定最佳跳数,不仅节省了网络的通信能耗,使网络能量负载得到均衡,而且能够减轻“热点问题”对网络性能的影响,有效地延长了网络的生存时间。

## 1 无线传感网络通信能耗模型<sup>[8]</sup>

假设无线传感网络中有  $N$  个传感器节点,其中簇头节点个数为  $h$ ,  $k$  为每个数据的信息位数,  $E_{DA}$  为数据融合消耗的能量,  $\varepsilon_{fs}$  为采用自由空间传输信道模型所用常数,  $\varepsilon_{mp}$  为采用多路径衰减模型所用常数,传输距离为  $d$  时,节点发射  $k$  比特的数据,消耗的能量为:

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

$$d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{mp}}$$

采用自由空间传输模型,簇头节点消耗的能量为:

$$E_{CH} = kE_{elec} \left( \frac{N}{h} - 1 \right) + kE_{DA} \frac{N}{h} + kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2 \quad (2)$$

式中:  $d$  是簇头节点发送数据的距离。

非簇头节点消耗的能量为:

$$E_{non-CH} = kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d_{toCH}^2 \quad (3)$$

式中:  $d_{toCH}$  是簇成员节点到簇头的距离。

## 2 基于图论的路由协议

### 2.1 Dijkstra 算法

Dijkstra 算法是图论中典型的最短路径算法,使用广度优先搜索思想,用于计算图中一个顶点到其他顶点的最短路径<sup>[9,14]</sup>。

$D = (V, A, \omega)$  是一个非负权网络,  $V$  为  $D$  的顶点集,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 其中的元素称为  $D$  的顶点。  $A$  为  $D$  的弧集, 其中的元素  $a$  称为  $D$  的弧, 为  $A$  中某两个元素构成的有序对的集合,  $a = \{v_i, v_j\} \in A$ 。  $\omega_{ij}$  代表  $(v_i, v_j)$  的权值。

$$\begin{cases} u_1 = 0 \\ u_j = \min\{u_k + \omega_{kj}\} \\ j = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_j$  是  $D$  中最短路径  $(v_i, v_j)$  的长度。如果  $D$  中从顶点  $v_1$  到各顶点的最短路径的长度按从小到大排列为:

$$u_{i_1} \leq u_{i_2} \leq \dots \leq u_{i_3}$$

$$i_1 = 1, u_{i_1} = 0$$

则由式(4)有:

$$u_{i_j} = \min_{k < j} \{u_{i_k} + \omega_{i_k i_j}\} =$$

$$\min \left\{ \min_{k < j} \{u_{i_k} + \omega_{i_k i_j}\}, \min_{k > j} \{u_{i_k} + \omega_{i_k i_j}\} \right\} \quad j = 2, 3, \dots, n$$

当  $k > j$  时,  $u_{i_k} \geq u_{i_j}$  且  $\omega_{i_k i_j} \geq 0$ , 得到  $u_{i_j} \leq u_{i_k} + \omega_{i_k i_j}$ ,

即  $u_{ij} \leq \min_{k>j} \{u_{ik} + \omega_{ikj}\}$ 。

于是得出：

$$u_{ij} = \min_{k<j} \{u_{ik} + \omega_{ikj}\} \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

根据式(5)就可以找到一条由出发点到终点的最短路径。

### 2.2 图的中心选址问题

图的最优选址问题是在一系列顶点中利用其最短距离矩阵求出图的中心,其条件是这个顶点在所有顶点中与离它本身最远顶点的距离取极小值<sup>[9]</sup>。

对于  $n$  个顶点的连通图,求它的中心首先要求出该图的最短距离矩阵。最短距离矩阵可利用最短路径算法 Dijkstra 算法得出。

$$d_{ij}^k = \min(d_{ij}^{k-1}, d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}) \quad (6)$$

式中:  $d_{ij}$  代表顶点  $v_i, v_j$  之间的弧长,按照 Dijkstra 算法反复使用迭代公式,就可以得到最后的结果。其中  $k$  为迭代次数,  $k = n$  时,就是  $v_i$  顶点至  $v_j$  顶点的最短距离的计算结果。

在最短距离矩阵中,求各行的极大值:

$$d_i^0 = \max_{1 \leq j \leq n} \{d_{ij}\} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

在  $n$  个极大值当中选取最小者:

$$d_{i_0}^0 = \min_{1 \leq i \leq n} \{d_i^0\} \quad (7)$$

则第  $i_0$  号顶点被确定为该图的中心,该点到所有顶点的距离最短。

### 2.3 基于图论的路由协议设计

本文提出的基于图论的分簇路由通信协议采用轮的概念,每轮分为成簇阶段和簇稳定工作阶段。在簇的建立阶段,传感器节点和基站交换节点 ID、位置、剩余能量等信息。在稳态阶段,簇头创建和分配时分多址接入计划表,为簇内的每个成员节点分配接收和发送数据的时隙<sup>[8]</sup>。

簇头接收成员节点的数据信息,并向基站传递数据,在每轮中完成最多的任务,也消耗最多的能量,依据节点能耗和剩余能量选取簇头有助于减小能量开支,均衡网络能耗<sup>[15-16]</sup>。簇的建立阶段,基于簇内节点的平均能量,选择剩余能量高的节点作为候选簇头,利用图的中心论算法在候选簇头当中选举产生最终簇头。基于平均能量的选举原则使能量大的节点有更大的概率当选为簇头,使得簇内能耗更为均衡,避免出现个别节点提早死亡的现象。利用图的中心算法产生的簇头位置分布均匀,减小了簇内节点通信能耗,而且解决了能量相同情况下竞选簇头的冲突问题。簇头选举流程如图 1 所示。

无线路由算法是无线网络协议栈重要的组成部分,一个好的路由算法应该有助于节省节点能量,避免出现节点能量过早耗尽的现象<sup>[17-18]</sup>。数据传输阶段利用图论

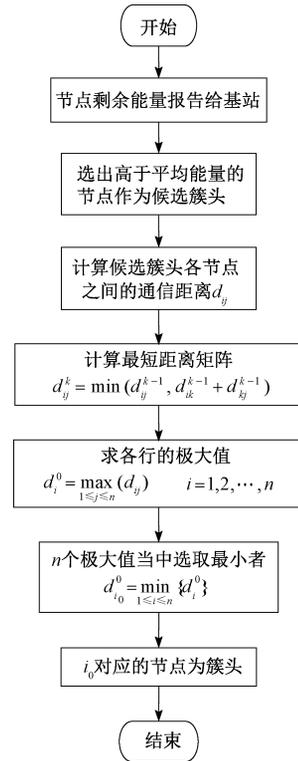


图 1 簇头选举算法流程

Fig. 1 The flow chart of cluster head

的 Dijkstra 算法,以通信能耗为权重,选择数据传输最佳路由,采取多跳传输策略,依据下一跳簇头的剩余能量及能量消耗情况,确定最佳跳数,均衡全网的能耗负载,既减小了距离基站较远的节点能耗,同时也避免了距离基站较近的节点因频繁转发数据导致能耗过大进而引发“热点问题”。流程如图 2 所示。

### 3 仿真结果及分析

将此协议用于助航灯单灯监控系统,使用 MATLAB 进行仿真验证,在生命周期、能量消耗及能耗均衡方面与 ECOMP、AL-CAME 进行了比较,结果表明基于图论的分簇通信协议有助于节省节点能量,有效均衡了网络负载,延长了网络生存时间。

图 3 所示为国内某机场北进近区机场助航单灯监控系统位置分布<sup>[8]</sup>。仿真参数如表 1 所示。此进近区助航灯数量 166 个,相邻两灯横向距离为 2 m,纵向距离为 30 m。每个节点初始能量为 1 J。整个区域划分为 5 个分区域,分别为 zone1、zone2、zone3、zone4 和 zone5,每个分区域内部安置一个高级节点作为中继和基站进行直接通信,中继节点的初始能量、传输能力及数据处理能力均大大高于普通传感器节点。

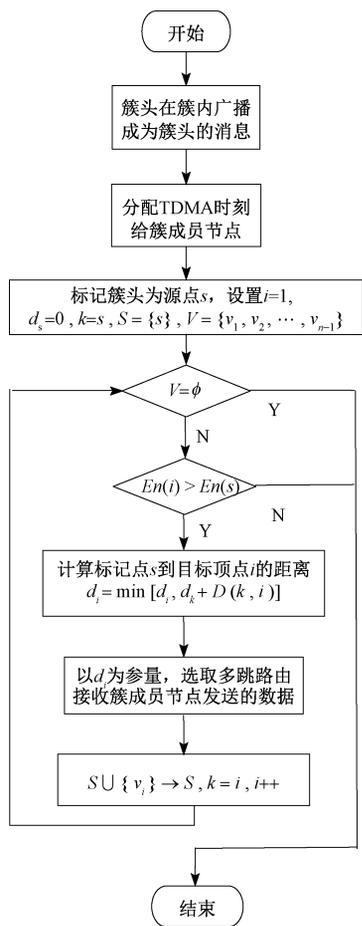


图 2 Dijkstra 算法流程  
Fig. 2 Flow chart of Dijkstra

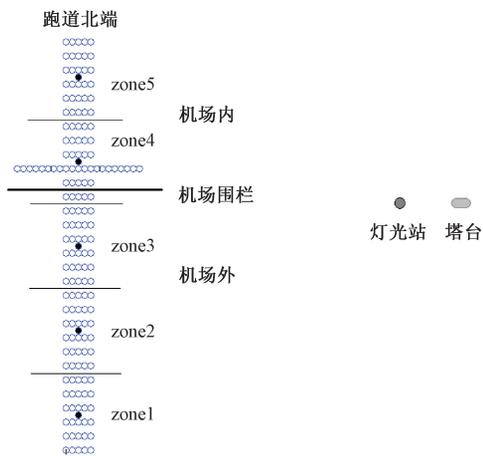


图 3 国内某机场北进近区的助航灯光位置分布  
Fig. 3 Location of airport light in civil north approach area

### 3.1 生命周期

图 4 所示为 AL-CAME、ECOMP 和基于图论的算法中生命周期的比较,由图 4 可见,与 ECOMP、AL-CAME

相比,基于图论的算法节点存活数量远远高于这两种算法。

表 1 仿真参数设置

参数名称	参数值
$E_{lec}$	50 nJ/bit
$E_{DA}$	5 nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10 pJ/(bit · m <sup>-2</sup> )
$\epsilon_{mp}$	0.013 pJ/(bit · m <sup>-4</sup> )

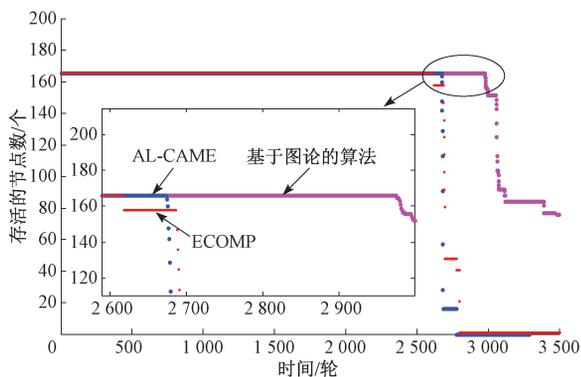


图 4 三种算法生命周期的比较  
Fig. 4 Comparison of life cycle

助航灯的分布特点横向距离较小,纵向距离过大,实际位置情况决定了纵向传输节点耗能大,通信能耗与距离的平方有关,通过计算可以得出数据纵向传输消耗的能量是横向的 200 多倍。AL-CAME 以位置均匀为原则选举产生簇头,而没有考虑助航灯空间分布特点,导致一个簇内近一半以上节点向簇头纵向发送数据,而且单跳传输导致某些距离基站较远的簇头节点最终因能量过早耗尽而死亡。

ECOMP 采用双向环状数据传输形式,一定程度上降低了节点纵向传输数据的几率,但是边界节点一直处于纵向大距离通信状态,导致这些节点能量会过早耗尽。基于图论的算法利用中心论算法及平均剩余能量原则产生簇头,将能耗均匀分到各个节点,利用最短路径算法,相应降低了网络的整体能量消耗,避免了个别节点因能耗过大而过早死亡。第一个节点死亡之后,节点存活数量迅速下降,也充分说明了基于图论的算法不仅延长了网络的生命周期,而且网络节点能耗分布均匀。

### 3.2 时间和网络剩余能量的关系

AL-CAME、ECOMP 和基于图论的算法中节点的剩余能量值和时间的关系如图 5 所示。

由图 5 可以看出,基于图论的算法能量消耗较为平缓,在每一轮节点的剩余能量都要高于 AL-CAME 和

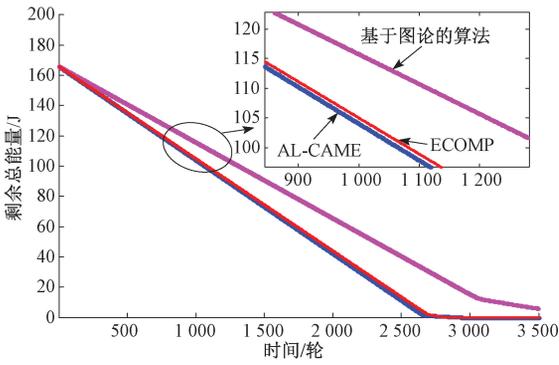


图 5 网络剩余能量对比

Fig. 5 Comparison of residual energy

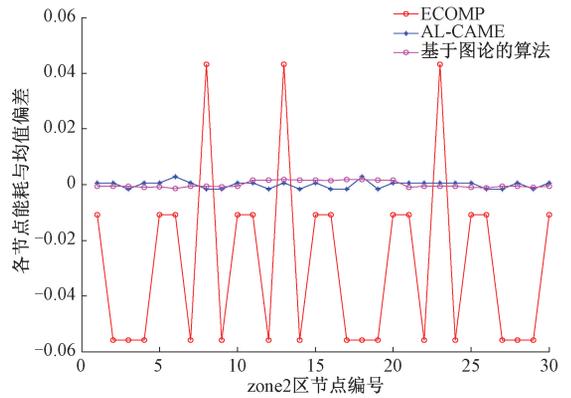


图 6 能耗均衡度比较

Fig. 6 Comparison of energy consumption balance

ECOMP 协议,算法能量效率高,随着运行时间增长,能耗差别越来越大,节能优势越来越明显。运行到 2 320 轮时,AL-CAME 节点平均剩余能量为 0.134 J,ECOMP 为 0.149 J,而图论算法为 0.269 J,与 AL-CAME、ECOMP 相比,能够节约近 1 倍的能量。AL-CAME 选举簇头没有考虑与基站的距离因素,单跳传输能耗较大,导致节点能耗下降很快。ECOMP 协议发送数据采用了多跳传输策略,节约了通信能耗,但是簇内数据多次融合带来的能耗过大,也导致了其能量下降过快。基于图论的算法基于簇内通信代价最小原则构造簇,充分考虑了数据传输的通信代价及簇头分布因素,采用多跳路由策略选取最佳跳数,有效解决了路由开销,提高了传感器的能量利用率。

### 3.3 能耗均衡度比较

2 500 轮时 zone2 内的各节点的剩余能量相对于其平均值的分布情况如图 6 所示。可见 ECOMP 能耗均衡度最差,AL-CAME 和基于图论的算法能耗均衡度比较好,基于图论的算法节点间能耗差别更小一些。ECOMP 协议中边界节点通信损耗大,导致节点间能量差别较大,能耗均衡度比较差。AL-CAME 各节点间能耗差别较小,这是由于在选举簇头时充分考虑了对称、空间位置均匀等因素,网络获得了较好的能耗均衡。但是这种均衡是建立在大能耗的代价之上的,由于纵向传输数据的节点过多,相应带来了节点能耗下降过快的问题。基于图论的算法能耗均衡度最好,因为依据平均剩余能量原则,结合中心论算法产生的簇头位置均匀分布,而且采取最佳路由和最佳跳数,使整个网络的能耗平均分配到每一个节点,有效实现了能耗在网络内部的均衡分布。

### 3.4 负载均衡

网络负载均衡是无线传感网络性能评价的一个重要标准。将助航灯的 zone2 按照节点与基站的位置分为 3 块区域,第 1、第 3 区域距离基站较远,第 2 区域距离基站较近。如果采用单跳传输,会出现节点单次通信的能耗

不均衡,第 1、第 3 区域节点由于距离基站较远,能量消耗远大于第 2 区域节点,会导致区域内节点过早死亡。如果采用多跳传输,第 2 区域节点由于距离基站较近,频繁承担中继转发任务会引起过多的能耗,会导致其能量消耗过快引发“热点问题”。基于图论的算法在多跳传输环节,利用下一跳节点的剩余能量决定最佳跳数策略,尽可能的减小了能耗差别,不仅使网络节点能耗得到了均衡,而且较好的避免了“热点问题”,同时也延长了无线网络的生存时间。基于图论的算法中 zone2 各区节点的能量消耗情况如图 7 所示。可以看到,1 000 轮之前 3 个区域节点能耗基本相当,由于第 2 区域节点要转发第 1、第 3 区域节点的数据,随着运行时间增长,第 2 区域节点能耗会逐渐大于第 1、第 3 区域节点,但由于采取了最佳跳数策略使其节点能耗又不至于下降过快。

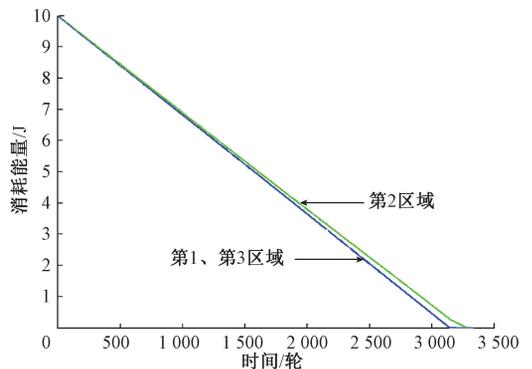


图 7 各区能量消耗

Fig. 7 Energy consumption in each region

### 3.5 算法复杂度分析

AL-CAME 基于最大剩余能量原则选举簇头,簇成员节点依据位置信息选择加入簇头,其算法复杂度为  $O(n)$ 。ECOMP 要求每个节点记录自己的位置信息和相邻节点信息,算法复杂度为  $O(n)$ 。图论中心论算法使用

最短路径矩阵结合平均能量原则选举簇头,其算法复杂度为  $O(n^3)$ 。稳态数据传输阶段 AL-CAME 算法复杂度为  $O(n)$ , ECOMP 要求每个簇头计算到其他簇头之间的距离,算法复杂度为  $O(n^2)$ 。基于图论的算法采取最佳跳数策略,算法复杂度为  $O(n^2)$ 。AL-CAME 算法复杂度低,易于实现,但是造成网络能耗过大,过早出现了死亡节点。基于图论的算法其算法复杂度虽然高于前两种,但是明显改善了无线传感网络的生命周期、能耗均衡等各项指标,延长了网络生存时间。

## 4 结 论

无线传感网络节点一般由电池供电,节点的能耗情况关系到网络的生命周期。一个高效的路由算法可以克服无线网络能量有限的特点,簇头是路由的关键节点,其失效将导致路由失败。本协议在成簇阶段,基于节点的平均能量,利用图论的中心论算法产生簇头,以降低簇内节点能耗,均衡能量开支。在稳定传输阶段,以通信能耗为权重,以节点剩余能量为参数,使用 Dijkstra 算法用于设计最佳路由及最佳跳数,以降低数据传输通信能耗,均衡网络能量负载。将此算法用于助航灯光单灯监控系统,并与 AL-CAME 和 ECOMP 算法进行了对比,结果表明,此算法使得网络节点能量消耗更小,实现了网络的能耗均衡,有效延长了网络的生命周期。

## 参考文献

- [ 1 ] 苏圣超,赵曙光. 基于能耗均衡的无线传感器路由算法[J]. 计算机科学,2018,45(10):111-114.  
SU SH CH, ZHAO SH G. Wireless sensor routing algorithm based on energy balance [J]. Computer Science, 2018,45(10):111-114.
- [ 2 ] 陈作汉,曹洁,赵付清. 基于 NSGA-II 的无线传感网络簇首选择算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2358-2365.  
CHEN Z H, CAO J, ZHAO F Q. A NSGA-II-based algorithm for WSN cluster head selection [J]. Control and Decision, 2019,34(11):2358-2365.
- [ 3 ] 黄利晓,王晖,袁利永,等. 基于能量均衡高效 WSN 的 LEACH 协议改进算法[J]. 通信学报, 2017,38(S2): 164-169.  
HUANG L X, WANG H, YUAN L Y, et al. Improved LEACH protocol algorithm for WSN based on energy balance and high efficiency [J]. Journal on Communications, 2017,38(Z2):164-169.
- [ 4 ] BAJABER F, AWAN I. An efficient cluster-based communication protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Telecommunication Systems, 2014,55(3):387-401.
- [ 5 ] AGHDA S A F, MAHDI M. An improved cluster routing

protocol to increase the lifetime of wireless sensor network (WSN)[C]. Wireless Personal Communication, 2019, 109:2067-2075.

- [ 6 ] HAWBANI A, WANG X F, KUHLANI H, et al. Sink-oriented tree based data dissemination protocol for mobile sinks wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2018(24):2723-2734.
- [ 7 ] 肖欣招,魏峰. 无线传感器网络能量改进路由算法研究[J]. 电子测量技术,2016, 39(10): 183-187.  
XIAO X ZH, WEI F. Energy efficient routing protocol for wireless sensor network [J]. Electronic Measurement Technology, 2016,39(10):183-187.
- [ 8 ] 王丙元,张心清. 基于能量均衡的助航灯光单灯监控 WSNs 路由协议[J]. 南京航空航天大学学报. 2015, 47(4):525-531.  
WANG B Y, ZHANG X Q. WSNs routing protocol of airfield lighting monitoring system based on energy balance [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(4): 525-531.
- [ 9 ] 高遵海,高颖,程果. 图的赋权路径与所有点对最短路径问题[J]. 计算机工程与应用,2017,53(9):47-50.  
GAO Z H, GAO Y, CHENG G. Weighted path matrix of graph and all pairs shortest path problem [J]. Computer Engineering and Application, 2017, 53(9): 47-50.
- [ 10 ] PRABHA K L, SELVA S. Energy efficient energy hole repelling (EEEHR) algorithm for delay tolerant wireless sensor network[J]. Wireless Personal Communications. 2018,101(3):1395-1409.
- [ 11 ] 吴红波,王英杰,杨肖肖. 基于 Dijkstra 算法优化的城市交通路径分析[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(4):116-121.  
WU H B, WANG Y J, YANG X X. Analysis of urban traffic vehicle routing based on Dijkstra algorithm optimization [J]. Journal of Beijing Jiaotong University. 2019,43(4):116-121.
- [ 12 ] 王树西,李安渝. Dijkstra 算法中的多邻接点与多条最短路径问题[J]. 计算机科学,2014,41(6):217-224.  
WANG SH X, LI AN Y. Multi-adjacent-vertexes and multi-shortest-paths problem of Dijkstra algorithm [J]. Computer Science, 2014, 41(6): 217-224.
- [ 13 ] 向敏,唐亮,王平. 基于 Dijkstra 能量均衡的无线 HART 图路由算法[J]. 仪器仪表学报,2016,37(11): 2628-2636.  
XIANG M, TANG L, WANG P. Energy balance graph routing algorithm based on Dijkstra for wireless HART networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2628-2636.
- [ 14 ] 郭慧,汪飞,张笠君,等. 基于撮合交易的能源互联网

最小网损路由算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14):172-179.

GUO H, WANG F, ZHANG L J, et al. Matchmaking tradeoff based minimum loss routing algorithm in energy internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):172-179.

- [15] 刘春, 金哲媛. 环境监测中无线传感器网络路由算法的改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 146-151.

LIU CH, JIN ZH Y. Improvement of routing algorithm for wireless sensor network in environmental monitoring [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(2): 146-151.

- [16] 马学森, 曹政, 韩江洪, 等. 改进蚁群算法的无线传感器网络路由优化与路径恢复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9):1320-1327.

MA X S, CAO ZH, HAN J H, et al. Routing optimization and path recovery algorithm in wireless sensor network based on improved and colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1320-1327.

- [17] 王延年, 张双双, 刘婷. 无线传感器低功耗路由算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2):115-117.

WANG Y N, ZHANG SH SH, LIU T. Low power consumption routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2):115-117.

- [18] 梁旭, 刘才慧. 基于混合粒子群算法的在线检测路径

规划[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 30-34.

LIANG X, LIU C H. Path planning for on machine verification system based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(12): 30-34.

## 作者简介



**高梅**, 1999年于华北工学院获得学士学位, 2004年于华北工学院获得硕士学位, 现为中国民航大学讲师, 主要研究方向为测控技术、图像处理。

E-mail: gaomeiok@126.com

**Gao Mei** received her B. Sc. degree from North China Institute of Technology in 1999, M. Sc. degree from North China Institute of Technology in 2004. Now she is a lecturer at Civil Aviation University of China. Her main research interests include measurement and control technology and image processing.



**王丙元**, 2002年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学教授, 主要研究方向为航空电子设备故障诊断与预测, 航空系统可靠性与适航研究。

E-mail: bywang@cauc.edu.cn

**Wang Bingyuan** received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2002. Now he is a professor at Civil Aviation University of China. His main research interests include aviation electronic equipment fault diagnosis and prediction and aviation system reliability and airworthiness research.