

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.008

## 基于能量均衡的助航灯光单灯监控 WSNs 路由协议

王丙元 张心清

(中国民航大学航空自动化学院,天津,300300)

**摘要:**机场助航灯光无线传感器网络能量有限,但部分灯光所处位置不规则,导致该区域设置的簇头节点因消耗较大过早死亡从而形成传输过程中的区域空洞,破坏了整个无线传感器网络的能量均衡,影响网络工作寿命。在分区路由协议的基础上提出能量均衡、簇头位置均匀分布的 WSNs 路由协议。该协议由两部分组成,针对不规则区域(对应单排长排灯位置)采用链式传输协议,对其他区域采用逻辑分区的分簇路由协议,在簇头选举算法中加入候选簇头节点分布区域限制和节点能量约束。为验证协议的有效性,按照机场灯光进近区灯光位置分布进行了 MATLAB 仿真。仿真结果表明,该协议具有良好的网络能量均衡能力,传感器网络可以获得较长的生命周期,适宜机场助航灯光监控类应用场合。

**关键词:**无线传感器网络;路由协议;助航灯光;能量均衡

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)04-0525-07

## WSNs Routing Protocol of Airfield Lighting Monitoring System Based on Energy Balance

Wang Bingyuan, Zhang Xinqing

(Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** There is an advantage of fixed physical location for airfield lighting in airport lamp monitoring using WSNs, but some lamp locations are irregular, which cause a large consumption of the cluster head node in this logic region, i. e., early death, thus forming the formation of voids during transmission, the undermining of the entire wireless sensor networks energy balance, and the reduced WSNs lifetime. To solve these problems a routing protocol is proposed with evenly distributed cluster head position, based on the routing protocols in a logical partition. The protocol is composed of two parts, a chaining transmission protocol and a cluster-based routing protocol. The chain transmission protocol is applied to the irregular region (corresponding to the long row lamp position), and the cluster-based routing protocol with logical partitions is applied to other regions. In the clustering routing protocol, the clustering head election algorithm is bound to join constraints. These two constraints are the location and the residual energy of the candidate cluster head. In order to verify the validity of the protocol, simulations are carried out with MATLAB referring the lighting position distribution in an airfield approach zone. Simulation results show that the protocol has good network energy balance ability. The sensor network has a long working lifetime, which is suitable for airport lamp monitoring.

**Key words:** wireless sensor networks; routing protocol; airfield lighting; energy balance

基金项目:国家自然科学基金——民航联合基金(U1333102)资助项目。

收稿日期:2015-07-01;修订日期:2015-08-01

作者简介:王丙元,男,教授,主要研究方向:网络测控自动化。

通信作者:王丙元,E-mail:bywang@nuaa.edu.cn。

助航灯光系统是机场重要的目视助航设备,是飞机在复杂天气条件下正常起飞、着陆及滑行的必要保障。随着中国民航运输业的快速发展,航班起降密度的不断加大,机场业务量的增大使得机场停机时间越来越短,灯光维修人员上跑道维修的时间越来越紧张,对机场助航灯光系统的可靠性和安全保障能力提出了更高的要求。机场助航灯光单灯状态监控系统可以对灯光状态进行自动监控,维修人员可以对灯光系统进行视情维修,从而提高机场运营保障能力。无线传感器网络技术具有低功耗、多节点分布式协作的特点,可实时监测、感知和采集监测对象信息,并通过无线传感网络以中继方式将信息传送到远处的应用终端。非常适合应用在机场助航灯光单灯状态监测场合。

无线传感器网络节点多使用电池供电,有限的能量是限制无线传感器网络发展的一个重要因素。尽管传感器节点的电池容易更换,但是如果网络能效太低或者各个节点的剩余能量不均衡,则会出现节点频繁死亡或断续死亡的现象,这样势必将助航灯光管理人员的工作由原来的巡检助航灯光转移到频繁更换监控节点电池上来,不能达到减少维修人员工作量的目的。因此如何保证各节点的能量均衡,减少节点能量消耗,从而延长网络使用寿命仍是面向助航灯光系统监测 WSNs 应用的关键问题。

无线传感器网络能量的开源节流技术方案主要表现在如下两个方面:(1)使用可充电网络补充节点能量,但此方案无疑增加建设成本<sup>[1]</sup>;(2)对能量受限的网络进行能量均衡研究。研究表明传感器节点的能耗主要集中在无线通信模块,路由协议的设计将显著地影响无线传感器网络寿命。近年来研究人员对 WSNs 网络的路由协议问题给予了极大关注,针对低功耗自适应集簇分层协议(Low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)协议提出了各种改进方案,如对簇头数进行优化<sup>[2]</sup>,簇头分布区域的优化,簇头选择算法的优化等,均获得了较好的仿真实验结果<sup>[3-5]</sup>。但也存在如下问题:(1)传感器网络应用环境是多变的,多数研究加入的约束条件过于复杂导致算法的复杂度增加,簇头节点能耗增加;(2)评价指标过分追求第1个节点死亡时间的比较,而忽略系统整体能量均衡问题。

在无线传感网络应用中存在着一大类节点静止、地理位置已知的监控应用,如机场助航灯光单灯监控即属此类。如何结合具体应用环境,设计更

为合理的面向助航灯光系统监测的无线传感网络协议是问题的关键所在。文献[6]在 LEACH 协议的基础上提出了面向助航灯光监测的路由协议,即基于能量和距离双重约束的单灯传感网络簇头选举算法(Airfield lighting-clustering algorithm based on distance and energy, AL-CADE),与 LEACH 相比,尽管 AL-CADE 延长了网络寿命,但进一步的研究发现,网络在使用寿命和能量均衡性方面仍有提升空间。本文在 AL-CADE 路由协议的基础上,提出了一种新的路由协议,即基于最大能量原则的单灯传感器网络簇头选举算法(Airfield lighting-clustering algorithm based on max energy, AL-CAME)。MATLAB 仿真结果表明,AL-CAME 的网络使用寿命在 AL-CADE 的基础上大大延长且网络能量均衡性好。

## 1 系统应用背景及能量损耗模型

某机场北进近区助航灯光地理位置分布如图1所示。每一个灯位安装一个传感器节点。基站放置在灯光站,与节点距离较远。假定各传感器节点具有如下特征:

- (1)除5个汇聚节点外(图1中左侧5个实心点),其他普通传感器节点同构、位置固定,具有唯一标识<sup>[6]</sup>。
- (2)每个传感器节点兼顾传统网络节点终端和路由器双重功能。
- (3)普通节点采用电池供电,初始能量相等,具有可控的发射功率。
- (4)节点大部分时间处于睡眠状态,只有在有监测任务时才被唤醒。

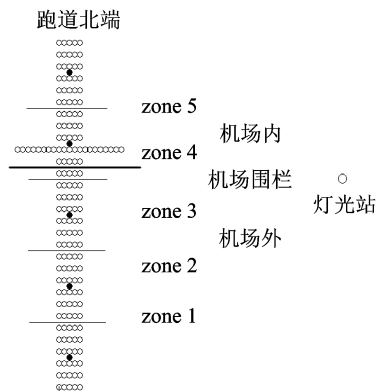


图1 机场北进近区灯光分布

Fig. 1 Airfield lighting distribution in north approach area

根据一阶无线电通讯能量损耗模型<sup>[7-9]</sup>,网络节点发送能耗可表示为

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

式中:  $E_{Tx}(k, d)$  表示发射  $k$  比特数据、传输距离为  $d$  时,发射机消耗的能量;  $E_{Tx\text{-elect}}(k)$  表示发射  $k$  比特数据时发射电路的能量消耗;  $E_{Tx\text{-amp}}(k, d)$  表示发射  $k$  比特数据、传输距离为  $d$  时功率放大器的能量消耗;  $\epsilon_{\text{fs}}, \epsilon_{\text{mp}}$  分别表示自由空间传输系数和多路径衰减传输系数;  $E_{\text{elec}}$  表示每比特数据在发射电路或接收电路所消耗的能量;  $d_0$  表示距离常数,  $d_0 = \sqrt{\epsilon_{\text{fs}}/\epsilon_{\text{mp}}}$ 。

助航灯光无线传感器网络节点间传输距离限制在 100 m 以内,传输功率 7 dBm,传输距离小于  $d_0$ ,可使用自由空间模型

$$E_{Tx}(k, d) = kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{\text{fs}}d^2 \quad d < d_0 \quad (2)$$

节点接收  $k$  比特消息消耗的能量为

$$E_{Rx}(k) = kE_{\text{elec}} \quad (3)$$

簇头节点数据融合时,1 bit 消耗能量为  $E_{\text{DA}}$ 。定义无线传感器网络的第  $r$  轮能量均值函数<sup>[10]</sup>为

$$E_{\text{ave}}^r = \frac{\sum_{i=1}^N E_{\text{res}}^r(i)}{N} \quad (4)$$

式中: $r$  为当前轮数;  $N$  为网络传感器节点总数;  $E_{\text{res}}^r(i)$  为节点  $i$  在第  $r$  轮的剩余能量。能量方差函数为

$$D_E(r) = \frac{\sum_{i=1}^N \{E_{\text{res}}^r(i) - E_{\text{ave}}^r\}^2}{N} \quad (5)$$

## 2 AL-CADE 路由协议

### 2.1 区域划分

如图 1 所示,机场助航灯分布在一个狭长区域,网络节点分布范围和节点规模相对较大。在大范围内保证传感器网络的全局能量均衡性和高效十分困难,解决该问题有效的方法之一就是逻辑分区缩小网络规模。根据传感器节点的分布特点,将整个网络划分成 5 个区域,分别标记为 zone 1, zone 2, zone 3, zone 4 和 zone 5,且在每个分区域内部安置一个汇聚节点<sup>[6]</sup>(能量不受限制,与普通节点相比,其计算、存储能力更强,且可和基站进行直接通信)。各分区内任意两个节点间可直接通信,各汇聚节点内保存各节点的 ID 和位置信息,并先完成簇头选举,然后广播通知区内各节点。簇头选举以区为单位进行。各分区算法过程独立,故以一个分区为例介绍 AL-CADE 路由协议的工

作过程。

### 2.2 簇头选举算法

AL-CADE 路由协议是基于 LEACH 的改进路由协议。与 LEACH 不同的是它的簇头选举算法在汇聚节点上完成。和 LEACH 相同的是它的工作过程也是按轮进行。每轮分为成簇阶段和簇稳定工作阶段。成簇阶段,汇聚节点为每个传感器节点产生一个 0~1 的随机数,若该随机数小于本轮的阈值  $T'(n)$ ,则该节点当选簇头,反之竞选簇头失败,在本轮中作为普通节点<sup>[6]</sup>。

$$T'(n) = \begin{cases} \frac{c_{\text{opt}}}{N - c_{\text{opt}} \left[ r \bmod \left( \frac{N}{c_{\text{opt}}} \right) \right]} \times \frac{E_{\text{ori}} - tE_{\text{ave}}^r}{E_{\text{ori}} - tE_{\text{res}}^r(i)} \times \frac{d_{\text{ave}}}{d(i)} & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$c_{\text{opt}} = \frac{\sqrt{N}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{fs}}}{\epsilon_{\text{mp}}} \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{d_{\text{toBS}}^2}} \quad (7)$$

式中: $c_{\text{opt}}$  为最优簇头数目;  $E_{\text{ori}}$  为当前节点的初始能量;  $t$  为一个常数;  $d_{\text{ave}}$  为分区中所有节点到汇聚节点的平均距离;  $d(i)$  为节点  $i$  与汇聚节点之间的距离;  $A$  和  $B$  为节点所在区域的长和宽;  $d_{\text{toBS}}$  为簇头到汇聚节点的距离。

簇头选举结束后,汇聚节点向所在区域广播本轮的簇头信息,之后簇头节点向所在区域的普通节点发出簇邀请。簇头产生一个时分多址(Time division multiple access, TDMA)时刻表,为簇内的各节点分配发送时隙,并且把时刻表向簇内成员进行广播。工作过程中,簇头节点将接收到的成员节点数据融合后发送给汇聚节点。数据发送完毕后,开始下一轮的工作。理论分析和仿真结果表明,AL-CADE 协议存在一些问题:

(1) AL-CADE 算法只能保证每轮选出的簇头数目不多于最优簇头数,如果要求每轮簇头数恰好等于最优簇头数,会出现反复选举的情况,从而导致算法效率降低,增加节点功耗。

(2) AL-CADE 在阈值公式中加入了距离约束,但它强调的是与汇聚节点距离越小的节点当选簇头的概率越大,并不能保证簇头节点的均匀分布。网络运行中仍会出现簇头节点分布不均的现象,而且这种分布不合理的现象会随着时间的推移不断增加,网络能量的均衡性因此遭到破坏。

(3) 由于 zone 4 区域存在一排长排灯,边缘节点数量较多,导致 zone 4 区域中心位置的节点过

早死亡,图2所示为运行至1480轮时AL-CADE节点状态图,其所在区域中心5个节点(图2中5个实心点)最先死亡。可见这样的网络均衡算法存在短板,系统存在“木桶效应”,降低了整个网络的使用寿命。

(4)算法中使用能量距离双重约束因子,且每一轮均进行簇头选举,导致计算量较大。

针对以上问题,本文提出了一种新的路由协议AL-CAME。

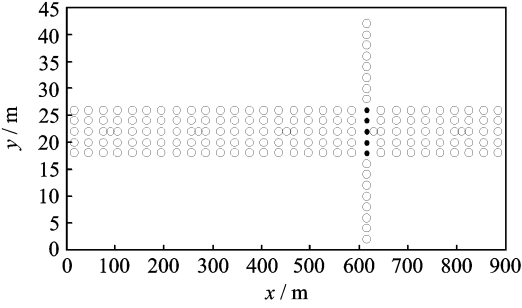


图2 第1480轮时AL-CADE节点状态图

Fig.2 Node state diagram using AL-CADE in 1480th round

### 3 AL-CAME 路由协议

#### 3.1 链式传输

zone 4 区域由于存在一排长排灯,比 zone 1 区域多了 16 个灯,也正是这 16 个灯对应的传感器网络节点最先死亡导致 AL-CADE 出现“木桶效应”。将 zone 4 区域突出部分的 16 个灯去除,节点分布和 zone 1 区域完全相同,如图 3 所示。为了便于描述,将 zone 1 区域的第 1 排、第 2 排和第 3 排统称为 zone 1-1;将第 4 排、第 5 排和第 6 排统称为 zone 1-2。

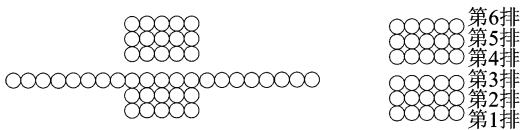


图3 zone 4 和 zone 1 区节点分布图

Fig.3 Distributions of nodes in zone 4 and zone 1

AL-CAME 路由协议在 zone 4 区域使用两种传输方式,对突出部分的 16 个灯位采用链式方式进行数据传输,即从最边缘的灯位开始依次融合相邻灯位节点信息,最后一个灯位节点将融合数据直接发送给汇聚节点<sup>[11]</sup>。剩余部分因构型和 zone 1 区域完全相同故采用和 zone 1 区域相同的基于簇头的分区传输协议。zone 1, zone 2, zone 3 和 zone 5 区域的节点分布相同,故使用 zone 1 区域来说明分簇选举问题。

#### 3.2 分簇传输协议

AL-CAME 路由协议与 AL-CADE 采用相同的网络要求,簇头选举算法也是在汇聚节点上完成。AL-CAME 路由协议依然采用“轮”的概念,每轮分为成簇阶段和簇稳定工作两个阶段。选择最优的簇头数量并保证簇头的均匀分布对提高网络能效和均衡性,延长整个网络的使用寿命都具有重要意义。AL-CAME 路由协议首先根据式(7)计算出 zone 1 区的最优簇头数  $c_{opt} = 4$  个。在簇头选择方面为保证簇头分布与节点分布的协调性,根据 zone 1 区节点以汇聚节点为中心呈对称分布的特点,每轮在 zone 1-1 和 zone 1-2 各选举两个簇头。

节点初始能量相同,第一轮在 zone 1-1 和 zone 1-2 区域随机选择两个节点作为簇头。以后簇头选举式为

$$T'(i) = \frac{E_{ori} - E_{ave}^{r-1}}{E_{ori} - \alpha E_{res}^{r-1}(i)} \times \beta \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为能量约束因子,取值范围  $0 \sim 1$ , 本文取为 0.8;  $\beta$  为区域约束因子,当候选簇头在对应区域内则为 1, 否则为 0。

网络以剩余能量为依据在 zone 1-1 内选择  $T'(i)$  最大的两个节点作为簇头,在 zone 1-2 选择  $T'(i)$  最大的两个节点作为簇头。此时网络簇头选举虽受到节点剩余能量和节点所在区域的双重约束,但算法较式(6)已大为简化。

### 4 仿真实验结果与分析

为评估网络性能需确定网络生命周期  $L_T$ 。本文定义整个网络的生命周期  $L_T$  为系统节点开始工作至系统节点 20% 死亡时对应的工作轮数。对任意节点  $i$ , 节点生命周期  $L_T(i)$  需满足

$$E_o = \sum_{r=0}^{L_T(i)} \left\{ \sum_{j \in R_i^r} E_{R_x}^r(k_{ji}) + k_r E_{DA} + \sum_{h \in T_i^r} E_{T_x}^r(k_{ih}) \right\} \quad (9)$$

式中:  $E_o$  为节点初始化能量;  $R_i^r$  为  $r$  轮要发送  $k_{ji}$  bit 数据给节点  $i$  的所有节点组成的集合;  $T_i^r$  为  $r$  轮要接收节点  $i$  发送  $k_{ih}$  比特数据的所有节点组成的集合;  $k_r$  比特为  $r$  轮节点  $i$  需要融合的数据。设  $r$  轮网络存活节点数为  $m(r)$ , 则

$$L_T = \max\{r; m(r) \leq 0.8N\} \quad (10)$$

首个节点死亡时间可表示为

$$L_{T-1} = \min\{L_T(i); i \in N\} \quad (11)$$

使用无线传感器网络的能量均值和能量方差函数衡量网络的能量均衡性。若  $r$  轮时  $m(r)$  大  $D_e(r)$  小, 则表明网络的能量均衡性好。

本文以 MATLAB 作为仿真工具,对 AL-CAME,AL-CADE 和分区 LEACH 进行仿真分析。仿真实验中,节点按照中国国内某机场北进近区助航灯光位置分布。同一排中相邻两节点之间距离 2 m,排与排之间相距 30 m。建立适当坐标系后,各汇聚节点的坐标分别为(90,22),(270,22),(450,22),(630,22),(810,22)。zone 1~zone 5 的区域范围分别为:180 m×10 m,180 m×10 m,180 m×10 m,180 m×42 m,180 m×10 m;总节点个数分别为 30,30,30,46,30。其他仿真相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真场景参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数名称	参数值
节点数量	166
节点初始能量/J	1
数据包长度/bit	4 000
$E_{elec}/(nJ \cdot bit^{-1})$	50
$E_{DA}/(nJ \cdot bit^{-1})$	5
$\epsilon_{fs}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^2)$	10
$\epsilon_{mp}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^2)$	0.013

图 4 为网络存活节点随时间(仿真轮数)的变化图,从图 4 可以看出,分区使用 LEACH 最早出现首个死亡节点,且在出现首个节点死亡后,存活节点数量快速下降,整个网络的生命周期短,网络能效很低。相对于分区使用 LEACH,AL-CADE 的首节点死亡时间明显延后,存活节点数量缓慢下降,说明 AL-CADE 有效延长了网络使用寿命。从第 1 个节点死亡到 20% 的节点死亡,分区使用 LEACH 经历了约 500 轮,AL-CADE 经历了约 1 000 轮,这在一定程度上反映了网络的能量均衡性,但也可以看到 AL-CADE 的网络能量均衡性仍有一定的提升空间。图 5 为各协议网络整体能量消耗随时间的变化曲线,从图中可以看出 AL-CADE 的能量消耗一直低于分区使用 LEACH,说明 AL-CADE 的网络能效高于分区使用 LEACH。从而可以得出结论:相比分区使用 LEACH,AL-CADE 通过提高网络能效延长了网络生命周期。

从图 4 还可以看出,AL-CAME 的首节点死亡时间为 2 600 轮,比 AL-CADE 延后了约 1 200 轮,而且 AL-CAME 在出现第一个死亡节点后,网络中除 zone 4 区域的 16 个长排灯对应的传感器节点外,其余节点在一个很短的时间段内全部死亡,说明网络能量均衡性很好。虽然此后 AL-CADE 的存活节点数量大于 AL-CAME,但此时 AL-CADE 已经有约 50% 的节点死亡,传感器网络基本瘫痪,这些存活节点是没有意义的。zone 4 区域

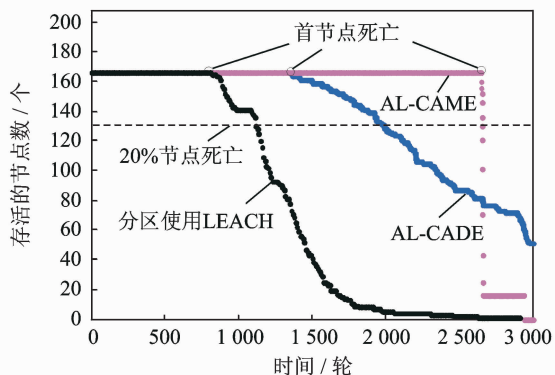


图 4 每轮剩余节点的数量

Fig. 4 Number of remaining nodes per round

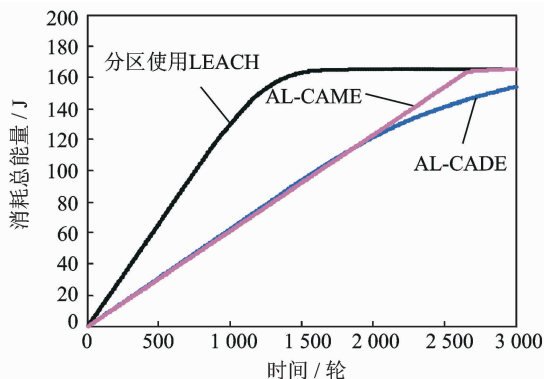


图 5 网络整体能量消耗

Fig. 5 Energy consumption of whole network

长排灯突出部分的 16 个节点在其余节点死亡后,又经历了约 200 轮,这说明长排灯部分对应节点使用链式方式传输数据是可行的。虽然 16 个节点的剩余能量高于其他节点,但在考虑网络能量均衡性时按 16 个节点的剩余能量和其他节点一致处理。

由图 5 可以看出,在前 2 000 轮 AL-CAME 和 AL-CADE 的网络能量消耗曲线近乎重合,这说明在前 2 000 轮 AL-CAME 和 AL-CADE 的网络能效基本相同。在 2 000 轮后 AL-CADE 的网络消耗能量低于 AL-CAME,主要是因为 2 000 轮后 AL-CADE 中已经存在一定量的死亡节点,网络中每轮消耗的能量下降。

图 6 给出了 3 种算法下网络的能量均衡方差。从图 6 可见,AL-CADE 总方差的幅值变化最大,分区使用 LEACH 次之,AL-CAME 的总方差幅值变化最小且在数值上也一直较小。AL-CADE 总方差的幅值最大且出现时间远远晚于分区使用 LEACH,这主要是因为 AL-CADE 协议的网络能量均衡能力弱于分区使用 LEACH,而能效高于分区使用 LEACH。图 6 说明使用 AL-CAME 算法网络能量均衡性最好。由以上分析可知,相比于 AL-CADE 和分区

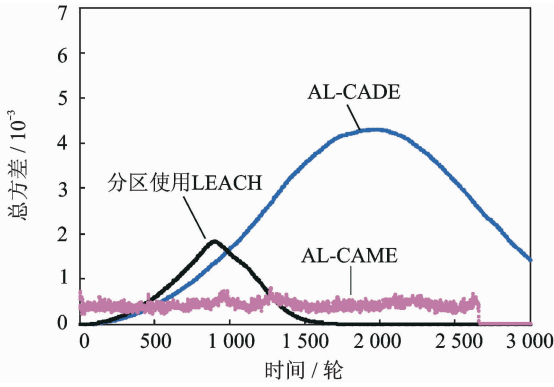


图6 不同算法下的网络能量均衡度

Fig. 6 Network energy balance degree under different algorithms

LEACH, AL-CAME 能够显著提高网络使用寿命的原因是:在和 AL-CADE 近乎相同的能效下,网络能量均衡性大大提高,即将整个网络的能量消耗平均分摊到每一个节点上。

为了更直观的说明 AL-CAME 的网络能量均衡性,本文给出了分区使用 LEACH、AL-CADE 和 AL-CAME 三种协议下 zone 2 区域内每个节点在多个时间点处的剩余能量,如图 7~9 所示。通过

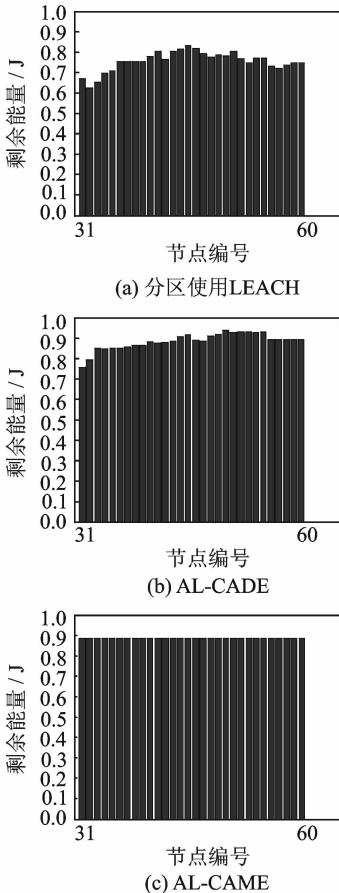


图7 300轮时 zone 2 区域各节点的剩余能量

Fig. 7 Residual energy of nodes in zone 2 after 300 rounds

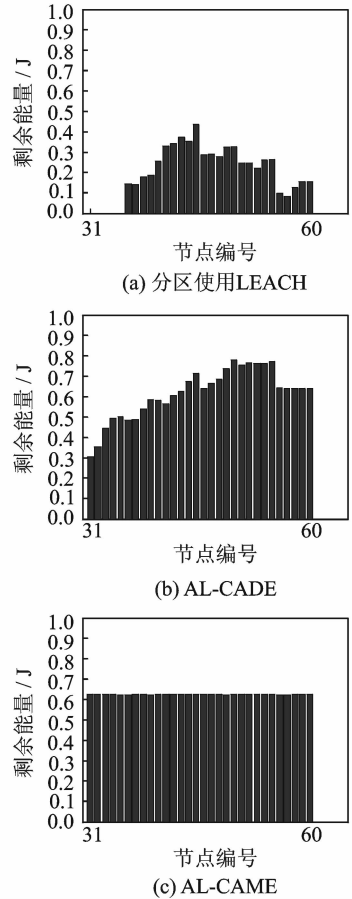
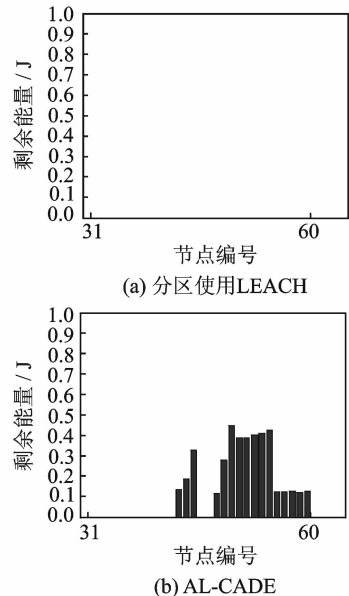


图8 1000轮时 zone 2 区域各节点的剩余能量

Fig. 8 Residual energy of nodes in zone 2 after 1 000 rounds

横向和纵向的比较可见,AL-CAME 的能量均衡性优于分区使用 LEACH 和 AL-CADE,而且 AL-CAME 在整个网络生命周期内都保持了很好的能量均衡性,而分区 LEACH 在 1 000 轮时能量均衡性已严重破坏,AL-CADE 在 1 000 轮时能量均衡



(b) AL-CADE

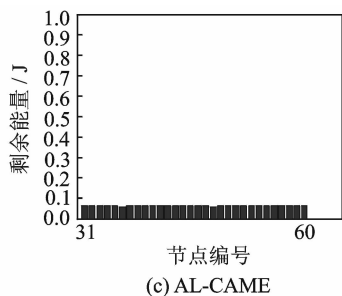


图9 2500轮时 zone 2 区域节点剩余能量图

Fig.9 Residual energy of nodes in zone 2 after 2500 rounds

性也已超出可接受的范围,只有 AL-CAME 在整个生命周期保持很好的能量均衡性。

## 5 结束语

本文在面向机场进近区助航灯光故障监测的 AL-CADE 路由协议的基础上,针对该协议存在的不足进行了改进,提出了新的 AL-CAME 路由协议。该协议提出了新的以最大剩余能量为依据的簇头选择算法,在簇头分布方面保持簇头分布与节点分布的协调性,提高了网络能量均衡性和网络生命周期;通过对不规则区域使用链式方式传输数据,克服了网络中的“木桶效应”。仿真实验结果表明,该协议在有效延长网络使用寿命的同时,网络能量均衡性很好,网络能效较高。

### 参考文献:

- [1] 丁煦,韩江洪,石雷,等. 多基站可充电无线传感器网络建模及优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 519-530.  
Ding Xu, Han Jianghong, Shi Lei, et al. Cross-layer modeling and optimization for rechargeable wireless sensor network with multiple base stations [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 519-530.
- [2] 蒋阳,孙柳林,敖文钧,等. WSN 中 LEACH 路由协议簇头数优化研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11): 4251-4253.  
Jiang Yang, Sun Liulin, Ao Wenjun, et al. Research on optimal cluster-head number of LEACH routing protocol for WSN [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4251-4253.
- [3] 张浩,李蜡元. 基于 LEACH 协议的能耗均衡由算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(7): 91-94.  
Zhang Hao, Li Layuan. Energy-balancing routing algorithm based on LEACH protocol [J]. Computer Engineering, 2011, 37(7): 91-94.
- [4] 王声才,李艾华,秦庆强,等. 无线传感器网络的自适应分簇组网算法研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(9): 2199-2022.  
Wang Shengcai, Li Aihua, Qin Qingqiang, et al. Research on self-adaptive clustering algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(9): 2199-2022.
- [5] 牟大年,王长山. WSN 中一种能量均衡的路由协议[J]. 传感技术学报, 2009, 22(2): 254-257.  
Mu Danian, Wang Changshan. Energy balance routing protocol in WSN [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(2): 254-257.
- [6] 王丙元,张晶晶. 机场助航单灯监控无线传感器网络低能耗路由研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1438-1444.  
Wang Bingyuan, Zhang Jingjing. Research on low-energy routing on single-lamp monitoring of airfield lighting [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10): 1438-1444.
- [7] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [8] 张志东,孙雨耕,刘洋,等. 无线传感器网络能量模型[J]. 天津大学学报, 2007, 40(9): 1029-1034.  
Zhang Zhidong, Sun Yugeng, Liu Yang, et al. Energy model in wireless sensors networks [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(9): 1029-1034.
- [9] 成小良,邓志东,董志然. 基于无线通信和计算特征分析的能耗模型[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(12): 1985-1993.  
Cheng Xiaoliang, Deng Zhidong, Dong Zhiran. A model energy consumption based on characteristic analysis of wireless communication and computation [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12): 1985-1993.
- [10] 蒋畅江,石为人,唐贤伦. 能量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.  
Jiang Changjiang, Shi Weiren, Tang Xianlun. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1222-1232.
- [11] 赵菊敏,张子辰,李灯熬. 一种无线传感器网络链式传输分簇路由协议[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(3): 135-138.  
Zhao jumin, Zhang Zichen, Li Dengao. A CRPCT for wireless sensor networks [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(3): 135-138.





