

## Research of Low-Energy Routing on Single-Lamp Monitoring of Airfield Lighting \*

WANG Bingyuan \*, ZHANG Jingjing

(Aviation Ground Special Equipments Research Base of Civil Aviation Administration of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To accomplish data collection by utilizing the limited resource in WSNs (Wireless Sensor Networks), and prolong the lifetime of the networks, a WSN routing protocol AL-CADE (Airfield Lighting-Clustering Algorithm based on Distance and Energy) based on logic zones was developed to monitor the airfield lighting in approach zone. In the protocol, the monitoring area was set several small logic zones according to geography locations of the nodes, and there were some advanced nodes placed in the logic zones as relay nodes. The cluster-head number of the nodes was optimized in the elliptical area, and the cluster-head election algorithm based on energy and distribution of nodes was put forward. The simulation results show that the protocol is effective in reducing node energy consumption and prolonging the network lifetime. The monitoring system of airfield lighting is essential for ensuring airplane safety during taking off and landing, and improving the work efficiency as well as guaranteeing ability of maintenance.

**Key words:** wireless sensor network; routing protocol; AL-CADE; network lifetime; approach zone; airfield lighting  
EEACC:6150P      doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.010.022

## 机场助航单灯监控无线传感器网络低能耗路由研究 \*

王丙元 \*, 张晶晶

(中国民航航空地面特种设备研究基地, 天津 300300)

**摘要:** 为合理利用节点有限的资源, 完成高效的数据采集任务, 延长无线传感器网络使用寿命, 以机场进近区助航灯的无线传感器网络监测为研究对象, 提出了针对机场助航灯监测的基于分区的 WSN (Wireless Sensor Network) 路由协议 AL-CADE (Airfield Lighting-Clustering Algorithm based on Distance and Energy)。该协议将监控区域按助航灯分布的地理位置分成几个区域, 在各分区中设置了高级节点作为中继节点。对椭圆分区内节点进行了簇头数优化, 提出了基于能量和距离分布的簇头选举算法。仿真结果表明: 该协议可有效降低节点能耗, 延长网络寿命。助航灯监控系统的使用对保障飞机的起飞和着陆安全, 提高机场维修工作效率和维修保障能力十分重要。

**关键词:** 无线传感器网络; 路由协议; AL-CADE; 网络寿命; 进近区; 助航灯光

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)10-1438-07

机场助航灯光系统是保障飞机在夜间、低能见度及其它复杂天气条件下正常起飞、着陆、滑行的必要的目视助航设备。其工作状态、可靠性与飞机安全密切相关。工作过程中, 助航灯的性能会因周围环境及自身寿命等因素出现故障, 影响飞行安全, 故对助航灯工作状态进行监控十分重要。

对于助航灯光系统, 需控制灯的开关、监测灯的工作状态。其中的关键问题在于每个灯位的信息如何从跑道周边的各灯位传递到位于灯光站的无线基

站和监控中心。现在国内各机场中使用的助航灯光监控系统中主要采取以下两种通讯方式: 电力载波和频分复用光纤通信。前者受线路参数变化影响、带宽受限; 后者实现技术复杂, 所需设备不易小型化, 且在国内已建机场进行光纤铺设并不现实。传统的监控系统中均采用从灯光供电线路中直接取电, 实践表明, 这是不可取的。国内某些机场发生过附加灯光监测设备出现故障影响到原助航灯光状态的问题(造成灯光系统里单灯发生短路)。基于以

项目来源: 天津市科技发展计划基金项目(06YFGZGX00800)

收稿日期: 2012-06-10      修改日期: 2012-08-31

上考虑,本文采用无线传感器网络(电池供电)进行监测及数据传送。根据中国民用航空无线电频率划分的有关规定,频段 420.00 MHz ~ 459.00 MHz 是机场允许使用的无线电频段。只要所构建的无线传感器网络发送、接收信息的使用频率在民航规定的范围内即可。

无线传感器网络集成了无线电通信技术、嵌入式计算机技术和微型传感器等各项技术<sup>[1]</sup>,能够协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并对其进行处理,最后通过特定的网络技术将需求的信息发送给监控中心。

网络中的助航灯监控节点可对助航灯进行监控,无线传感器网络节点间可相互通信,无线基站向可寻址的无线传感器节点发送采集、控制指令和接收灯位状态信息,通过无线传感器节点向上传输获得各进近灯的状态信息。

对于机场助航灯光单灯监控系统来说,监控节点要长时间工作,使用电池供电,一旦传感器节点出现能量匮乏,整个网络将会受到影响。因此,如何合理有效地使用网络节点能量,延长网络寿命,是无线传感器网络路由协议设计中重点解决的问题。

为有效降低能耗,延长网络寿命,本文在 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 协议基础上,针对机场助航灯光的位置特点,提出了一种面向机场进近区助航灯光单灯监控系统的路由协议—AL-CADE (Airfield Lighting-Clustering Algorithm based on Distance and Energy)。该协议对监控网络进行了区域划分,在各区域中设置高级节点作为中继,对椭圆监测分区内簇头数进行了优化,在簇头选举算法中引入了距离和能量因子作为约束。

## 1 系统模型

### 1.1 系统应用背景

跑道的进近灯光是目视飞行段的重要助航设施,安装了助航灯光可以降低天气标准,作为飞行员,看到了“灯光”也就看到了机场,进近中线灯和其它灯光可以帮助飞行员迅速对准跑道,实施降落。本文以国内某机场北进近区助航灯光为背景进行研究,如图 1 所示。

其系统模型可做如下描述:

166 个传感器节点按照北进近区助航灯光位置分布,周期性采集助航灯光状态信息,且具有如下性质:

(1)所有传感器节点位置固定,不再移动,并且都有唯一的标识。

(2)无线基站唯一且位置固定,距离节点分布区域较远。

(3)所有节点具有相同信息处理和通信能力(高级节点除外),都具备数据融合的功能。

(4)节点发射功率可控且普通节点能量不能补充。

(5)节点在没有任务时处于睡眠状态,有监测任务时被唤醒<sup>[2]</sup>。

这里根据距离阈值  $d_0$ ,确定是采用多路衰减无线通信模型还是自由空间无线通信模型。

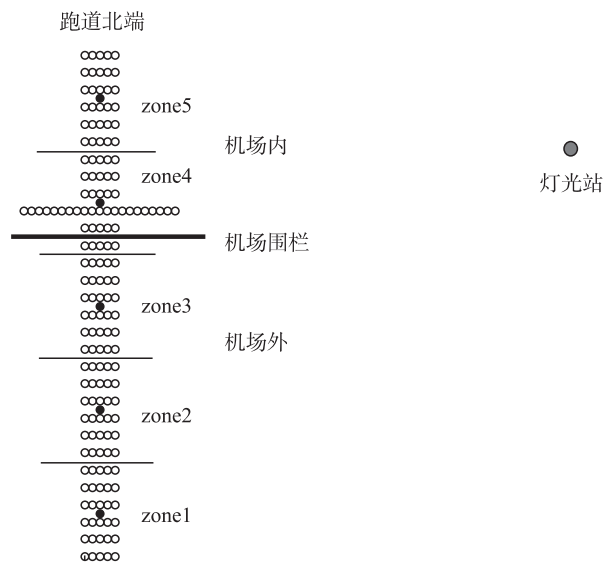


图 1 机场北进近区灯光分布

### 1.2 无线传输能量模型

无线传感器网络能量有限,故在无线传感器网络中,信道能耗模型关系着路由算法的设计。在对分簇算法进行的过程中,所使用的信道损耗模型如图 2,后面的改进也基于此模型参数<sup>[3]</sup>。

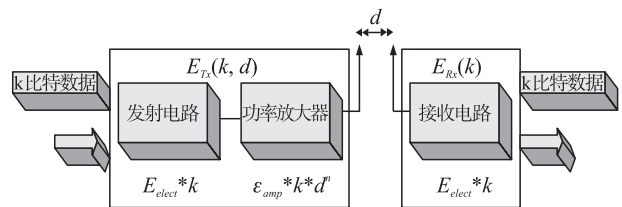


图 2 信道损耗模型

该模型把发射电路的发射能量、接收电路接收信号的能量,以及功率放大器的消耗能量列入考虑范围内。信号强度的损耗取决于传输距离的远近,当传输距离相对较远时,路径损耗指数为 4;当传输距离相对较近时,路径损耗指数为 2。另外,设置功率放大器的目的是用于路径损耗补偿,以确保信号到达目标节点时的信噪比满足接收机可以接收的值,所以当传输距离为  $d$ 、发射  $k$  比特数据时,发射

机消耗的能量如下:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx\text{-elect}}(k) + E_{Tx\text{-amp}}(k, d) \quad (1)$$

其中,  $E_{Tx}(k, d)$  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, 公式如下<sup>[3-4]</sup>:

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

$\epsilon_{fs}$  和  $\epsilon_{mp}$  是两个常数, 它们同所采用的传输信道模型有关,  $\epsilon_{fs}$  表示自由空间传输,  $\epsilon_{mp}$  表示多路径衰减传输。  $E_{elec}$  为每比特数据在发射电路或接收电路中所消耗的能量,  $d$  表示发射机与接收机之间的距离,  $d_0$  为一个距离常数, 定义如下:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (3)$$

采用何种传输信道模型, 依赖于传输距离的远近。若传输距离小于阈值  $d_0$ , 采用自由空间模型; 反之, 采用多路衰减模型。当距离大于  $d_0$  时所产生的路径消耗会相当大, 因此一般要求传输距离不大于  $d_0$ 。接收  $k$  比特的消息, 接收机消耗的能量为<sup>[3-4]</sup>:

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (4)$$

$E_{Rx}(k)$  表示接收机接收  $k$  比特数据时消耗的能量,  $E_{elec}$  同上。另外, 簇头节点进行本地数据处理和数据融合时, 每处理 1 比特的数据消耗的能量为  $E_{DA}$ 。

## 2 LEACH 路由协议

根据传感器网络拓扑的逻辑结构, 可将路由协议分为平面路由协议和分层路由协议<sup>[5]</sup>。平面路由协议中传感器节点之间的地位平等, 具有相同功能, 该路由简单, 健壮性好, 但建立、维护路由的开销大, 数据传输跳数多, 适合小规模网络; 分层路由协议中节点地位不平等。网络通常被划分为簇, 可以利用节点有限的资源, 完成高效的数据采集任务, 延长网络使用寿命<sup>[6]</sup>。该路由扩展性好, 适合大规模网络。LEACH 就是分层路由协议。

LEACH 路由协议按轮进行, 每轮都分为初始化和稳定工作两个阶段, 为了分散各个节点的能量消耗, 对簇头节点进行轮换选择。

每轮初始化阶段, 各传感器节点根据网络中簇头个数百分比自主地决定是否在本轮充当簇头。节点产生一个 0~1 的随机数, 若该数小于阈值  $T(n)$ ,

则向全网广播其成为簇头的消息, 反之就放弃当选簇头<sup>[3]</sup>。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P[r \bmod (1/p)]} & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $r$  是已完成轮数;  $p$  是网络中簇头节点个数占总节点个数的百分比;  $G$  是在前  $1/p$  轮中未充当簇头节点的节点集合。

初始化阶段, 节点当选为簇头后, 簇头主动把其当选为簇头的信号向网络中的其它节点广播。其它非簇头节点在接收来自不同簇头节点的广播信息后, 根据各信号的强弱来判定其与各簇头节点之间的距离, 由此选择所属簇, 然后向相应的簇头节点发送确认消息。稳定工作阶段, 簇头节点收到非簇头节点加入簇的信息之后, 会随后产生一个 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, 簇头节点接收到各个成员节点发送来的信息, 融合成为一个数据包然后发送给基站。数据发送完毕后, 开始新一轮的工作<sup>[7]</sup>。

但是, LEACH 协议存在很多问题:

(1) 由于簇头选举的随机性, 很容易产生累积误差, 导致选举出的簇头数目偏离期望的最优值。

(2) 在选择簇头时, 并没有考虑到簇头的剩余能量<sup>[8]</sup>。可能会造成某个节点当选为簇头后, 剩余能量不够支持本轮通信使用, 导致整个簇通信失效, 丢失簇成员节点采集的数据, 导致检测区域出现盲区。

(3) 因为选举簇头是个随机过程, 在网络规模较大的情况下, 易造成场景中簇头位置分布不合理, 容易发生部分区域过密, 部分区域过稀, 造成边缘分布的情况, 使网络负载失衡, 影响网络生命周期<sup>[7]</sup>。

(4) 多个簇头与基站单跳通信, 尤其是当簇头节点位置距离基站较远时, 与基站传输数据需要消耗大量的能量, 导致簇头节点过早死亡, 加快网络总能量的消耗。

针对以上问题, 本文改进了 LEACH 的簇头选择算法, 引入了能量函数和距离分布函数, 并且在监测区域和基站之间布置了中继节点, 以减少簇头与基站直接通信的能量消耗。

## 3 AL-CADE 路由协议

### 3.1 区域划分

与传统路由协议中 WSN 节点的随机分布不同, 本文中用于助航灯状态监测的传感器节点按照某机场北进近区的助航灯光位置分布。考虑到基站距离

较远和节点传输技术能力有限,导致有些距基站较远的节点不能和基站进行直接通信。本文根据传感器节点的分布特点和各节点的通信范围,将整个区域划分为 5 个分区域,分别记为 zone1、zone2、zone3、zone4 和 zone5,且在每个分区域内部安置一个高级节点(初始能量、传输能力及数据处理能力均大大高于普通节点,且可和基站进行直接通信)作为中继,如图 1 所示。这里把各中继节点看做各分区内的“基站”,各分区内任意两个节点间可直接通信,各分基站内保存了各节点的 ID 和位置信息,然后发送信息给其管辖区域内的各节点,告知其所属那个区域<sup>[6,9]</sup>。

区域划分完成后,就要分别在不同分区进行簇头选举。因为各分区的算法完成过程是独立的,下面以其中一个分区为例进行研究。

### 3.2 簇头节点数的优化

LEACH 中,网络中簇头过少时,非簇头节点与簇头节点之间传输距离增大,能量消耗增加;簇头数目太多时,会造成有些节点因不必要的数据融合能量耗尽过早死亡<sup>[10]</sup>。两种情况都直接影响着整个网络的生命周期,因此,选择合适的簇头数目对延长整个网络的寿命起着很大作用。

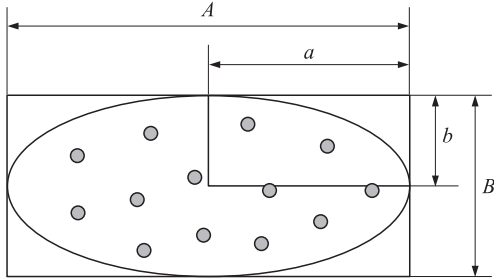


图 3 节点在椭圆区域中均匀分布

通过分析网络中每一轮中通信消耗的能量,对所选簇头的数目进行优化,选出最优的簇头数使得能耗能够在网络中平均分配,由此延长网络的生命周期。基于该思想,假设各簇的规模相同,即每个簇都有一个簇头节点,有相同数目的非簇头节点;结合助航灯光分布特点,假设有  $N$  个节点均匀分布在  $A \times B$  的长方形区域内,为便于分析,将其看作内切于长方形的椭圆,如图 3 所示。簇的个数表示为  $c$ ,则每个簇内有  $N/c$  个节点(1 个簇头,  $N/c-1$  个普通节点)。结合无线传输能量模型和 LEACH 协议得知,每个簇头节点的能耗包括接收该簇中簇成员发送来的数据所消耗的能量,融合数据消耗的能量和发送融合后数据给基站所消耗的能量<sup>[10-11]</sup>。故每个簇头节点能量消耗公式如下:

$$E_{CH} = lE_{elec} \left( \frac{N}{c} - 1 \right) + lE_{DA} \frac{N}{c} + lE_{elec} + l\epsilon_{mp} d_{toBS}^4 \quad (6)$$

其中:  $l$  为数据比特数;  $d_{toBS}$  为簇头到基站的距离;  $E_{elec}$  为每比特数据在发射电路或接收电路中所消耗的能量;  $E_{DA}$  为处理 1 比特的数据消耗的能量;  $\epsilon_{mp}$  为一常数。

考虑到簇内部普通节点到簇头节点的距离较近,故普通节点向簇头节点发送数据所消耗的能量在自由空间模型下计算,公式如下<sup>[12]</sup>:

$$E_{non-CH} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs} d_{toCH}^2 \quad (7)$$

其中:  $d_{toCH}$  是簇内普通节点到该簇簇头节点的距离。  $\epsilon_{fs}$  为一常数。

每个簇所占区域又可以看成与长方形区域成比例的小长方形,其面积为  $A \times B / c$ ,然后抽象为与其内切的小椭圆,长轴和短轴分别表示为  $a$  和  $b$ ,可计算出它们和  $A$ 、 $B$  的关系:

$$a = \frac{A}{\sqrt{c\pi}}, b = \frac{B}{\sqrt{c\pi}} \quad (8)$$

我们假设  $f$  为整个区域内的节点密度:

$$f = 1 / (A \cdot B / c) = \frac{c}{A \cdot B} \quad (9)$$

那么每个簇内普通节点到该簇簇头节点距离的平方的数学期望可如下计算:

$$E[d_{toCH}^2] = \iint (x^2 + y^2) f(x, y) dx dy = \iint \rho^2 (a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta) f(\rho, \theta) ab \rho d\rho d\theta \quad (10)$$

此处,  $f(\rho, \theta)$  是一个与  $\rho$  和  $\theta$  无关的常数,故上式可进一步写成:

$$E[d_{toCH}^2] = 4f \int_0^1 \rho^3 d\rho \int_0^{\pi/2} ab (a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta) d\theta \quad (11)$$

将(8)和(9)代入式(11),那么

$$E[d_{toCH}^2] = \frac{A^2 + B^2}{4c\pi} \quad (12)$$

将(12)代入式(7),得到,

$$E_{non-CH} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs} \frac{A^2 + B^2}{4c\pi} \quad (13)$$

因此,任一簇消耗的总能量可表示为<sup>[10]</sup>:

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left( \frac{N}{c} - 1 \right) E_{non-CH} \approx E_{CH} + \frac{N}{c} E_{non-CH} \quad (14)$$

网络消耗的总能量如下:

$$E_{general} = cE_{cluster} = l \left( E_{elec} N + E_{DA} N + c\epsilon_{mp} d_{toBS}^4 + E_{elec} N + \epsilon_{fs} N \frac{A^2 + B^2}{4c\pi} \right) \quad (15)$$

由上式可知,  $E_{general}$  是关于  $c$  的函数,根据求极值的方法,对函数求导,解得  $E_{general}$  取最小值时,  $c$  的

值,即簇头节点数的最优值为:

$$c_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs} \sqrt{A^2+B^2}}{\varepsilon_{mp} d_{toBS}^2}} \quad (16)$$

同理,由期望公式可导出式(16)中的

$$E[d_{toBS}^2] = \frac{c\pi}{64}(A^2+B^2) \quad (17)$$

将网络的具体参数代入式(16)就可以计算出网络中的簇头数的最优范围,从而控制网络运行过程中产生的簇头数量始终保持在该范围内,减少网络能耗。

### 3.3 簇头选举算法

簇头的产生是形成簇的基础,选举簇头时,每个节点产生一个 0~1 之间的随机数,若节点  $n$  产生的随机数小于阈值  $T(n)$ ,则该节点把它是簇头的消息向周围节点广播<sup>[12]</sup>。由于 LEACH 算法中未考虑到节点剩余能量和距离因素,新算法在原来阈值公式的基础上进行了改进,如式(18)所示<sup>[13-14]</sup>。考虑节点的剩余能量及节点的分布位置,提高剩余能量多的节点当选为簇头的概率,进而平衡网络能量,同时降低分布在边缘的节点成为簇头的概率。

$$T'(n) = \begin{cases} \frac{c_{opt}}{N-c_{opt}} \left[ r \bmod \left( \frac{N}{c_{opt}} \right) \right] \times \frac{E_{ori} - tE_{ave}^r}{E_{ori} - tE_{res}(i)} \times \frac{d_{ave}}{d(i)} & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $r$  是目前循环进行的轮数;  $E_{ori}$  为节点的初始能量;  $E_{res}(i)$  是节点  $i$  的剩余能量;  $E_{ave}^r$  是第  $r$  轮网络中的平均剩余能量;  $t$  是一个常数;  $d_{ave}$  表示网络中所有节点到基站平均距离;  $d(i)$  是节点  $i$  与基站之间的距离。其中,  $d_{ave}$  的表达式如下:

$$d_{ave} = \iint \sqrt{x^2+y^2} dx dy = \iint f_0 \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} ab \rho d \rho d \theta \quad (19)$$

该式为一个完整的第二类椭圆积分,将密度  $f$  代入,化简式子得:

$$d_{ave} = \frac{4}{3} a^2 b f_0 \left[ E \left( \frac{\pi}{2} \middle| 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) - E \left( 0 \middle| 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \right] \quad (20)$$

式中,  $E(x|m) = \text{Elliptic } E[x, m]$  是一个椭圆函数。

由于在每个区域中,  $a = \frac{A}{2}, b = \frac{B}{2}$ , 故把  $a, b$  和  $a = \frac{A}{2}, b = \frac{B}{2}$  和  $f_0 = \frac{1}{\pi ab}$  代入,进一步将式子化简为:

$$d_{ave} = \frac{2A}{3\pi} \left[ E \left( \frac{\pi}{2} \middle| 1 - \frac{B^2}{A^2} \right) - E \left( 0 \middle| 1 - \frac{B^2}{A^2} \right) \right] \quad (21)$$

### 3.4 协议描述

AL-CADE 路由协议首先由无线基站对监控区域进行分区处理,再计算各分区内的最优簇头数目。

根据基站给定的最优簇头数,各分区分别进行基于能量和距离分布的簇头选举。被选举出来的簇头随后在其所在分区内进行广播,非簇头节点则向距离最近的簇头发出加入簇的请求。数据传输阶段,簇成员按照簇头节点发来的 TDMA 时隙向簇头传送信息,簇头将接收的所有簇成员信息进行融合,传递给其区域内的分基站(中继节点)。最后由各分基站将信息传给无线基站。具体流程如图 4。

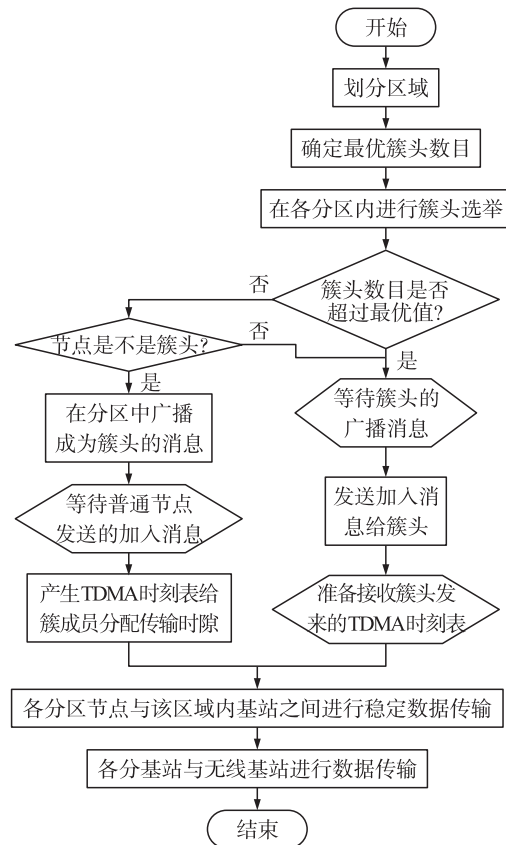


图 4 AL-CADE 协议流程

## 4 实验结果分析

在仿真实验中, WSN 网络由 166 个节点组成,节点按照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,各分基站的坐标分别为 (90, 22), (270, 22), (450, 22), (630, 22), (810, 22)。由于整个区域形状的不规则性, Zone1 ~ Zone5 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; 通过计算解得这几个区域的最优簇头数依次为: 4, 4, 4, 5, 4。

本文以 MATLAB 作为仿真工具,模拟实现了 LEACH 和 AL-CADE 的仿真,并进行了比较。其它相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真场景参数

参数名称	参数值
节点数量	166
初始能量	1 J
数据包长度	4 000
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$E_{DA}$	5 nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10 pJ/(bit·m <sup>-2</sup> )
$\epsilon_{mp}$	0.001 3 pJ/(bit·m <sup>-2</sup> )

图 5 是存活的节点数与轮数关系图。可以看出,全网络中应用 LEACH 算法在整个生命周期曲线比较陡峭,网络中节点的存活数量随时间的推移急剧下降,首节点失效出现时间过早,网络中节点的能量非常不均衡。分区使用 LEACH 明显降低了节点死亡的速度,但首节点仍然失效太快。AL-CADE 曲线明显比 LEACH 平滑,由于考虑了每个区域的最优节点数,在选举簇头节点算法中加入了剩余能量和距离分布因子作为约束,性能明显优于前两者,显著降低了节点能耗,推迟了首节点的失效时间,延长了整个网络的生命周期。

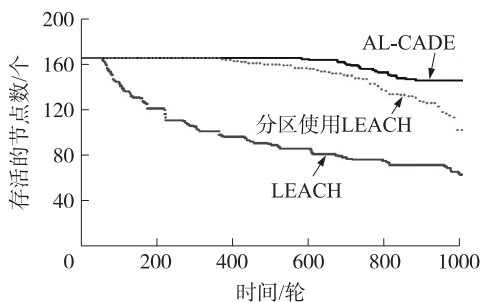


图 5 每轮剩余节点的数量

表 2 统计了网络运行 3 个不同算法发生首个节点失效时的轮数及网络有 10% 节点失效时的轮数。表中数值都是经过多次运行相应算法得出的平均值,针对机场助航灯光特有的应用背景,这里用首节点的死亡轮数来衡量网络稳定周期,用 10% 节点失效来衡量网络生命周期。

由表 2 可见,相对于另外两种协议来说,AL-CADE 网络的稳定周期分别延长了 59% 和 1 073%,生命周期分别延长了 15% 和 935%,网络的节点能耗得到进一步均衡,避免了“盲节点”过早的发生。

表 2 网络稳定周期与生命周期比较

协议名称	首节点失效轮数	10% 节点失效轮数
AL-CADE	575	828
分区使用 LEACH	361	723
LEACH	49	80

图 6 是网络节点剩余总能量随轮数变化的曲线。如图所示,AL-CADE 每轮网络剩余的总能量一直高于分区使用 LEACH 和全网使用 LEACH 两种情况,从中可以得出,AL-CADE 算法的能效最高,剩余能量最多。

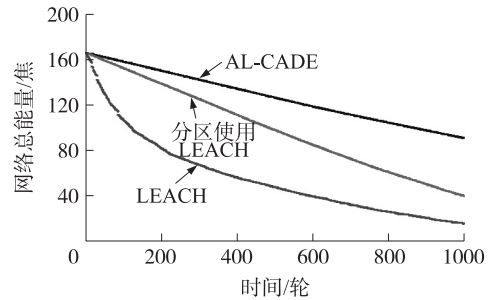
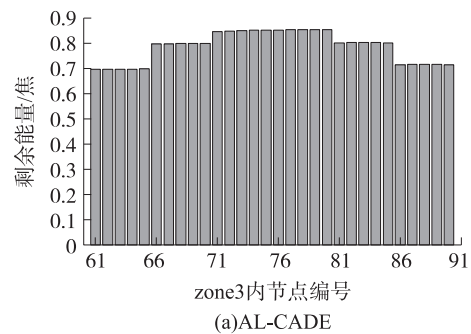
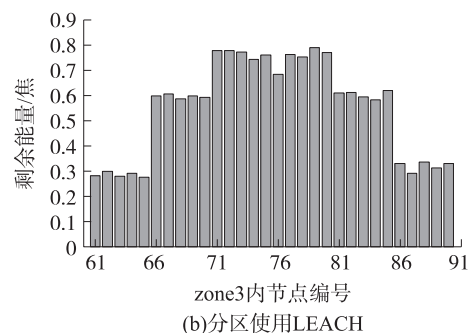


图 6 每轮网络中的能量

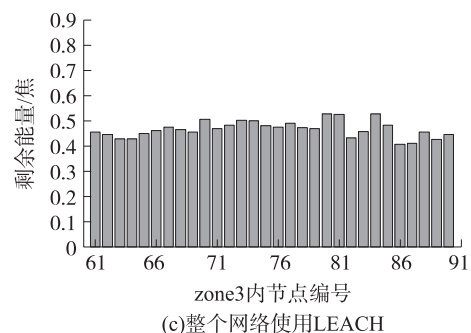
图 7 分别给出了 700 轮后 AL-CADE(图 a)、分区使用 LEACH(图 b)和整个网络使用 LEACH(图 c)三种协议运行情况下 zone3 区域内每个节点的剩余能量。节点的初始能量为 1 J。可见,AL-CADE 相对于其它二者来说,明显地节省并均衡了网络能量。



(a)AL-CADE



(b)分区使用LEACH



(c)整个网络使用LEACH

图 7 分区内节点剩余能量

通过上述分析可知,AL-CADE 中对区域进行了划分,并对各区域内的簇头数进行了优化,引入了能量和距离分布因子,并且在被检测的各分区中设置了起中继作用的高级节点,作为分基站。这些改进措施可以明显地节省网络中的通信能量,相比传统的分簇算法 LEACH 更能均衡网络中不同位置节点的能量消耗,减少簇头的通信能量负载,整体上有效地延长了网络的生命周期。

## 5 结语

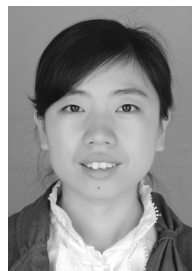
本文提出了面向机场进近区助航灯光故障监测的 AL-CADE 路由协议,并结合本系统实际应用进行了网络仿真实验。该协议对监控区域进行了分区处理,在各分区内设置了高级节点作为中继,对椭圆分区内的簇头数进行了优化,并在簇头选举算法中加入能量和距离因子作为约束。实验证明该协议有效地降低了节点能耗,延长了无线传感器网络的生命周期,为进一步工程实践打下良好基础。该方法同样适用于节点位置固定、节点分布区域近似椭圆的无线传感器网络。

### 参考文献:

- [1] 林恺,赵海,尹震宇.一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法[J].电子学报,2008,36(4):824-828.
- [2] 王雪,丁梁,王晟.层次分簇的无线传感网络多级优化测量[J].机械工程学报,2009,45(4):1-7.
- [3] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [C]//Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences,2000:3005-3014.
- [4] 李成法,陈贵海,叶懋.一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J].计算机学报,2007,3(1):27-36.
- [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.
- [6] 闫斌,周小佳,王厚军.一种基于地理位置信息的高能效无线传感器网络[J].自动化学报,2008,34(7):743-751.
- [7] 张震,闫连山,潘炜.基于 LEACH 和 PEGASIS 的簇头成链可靠路由协议研究[J].传感技术学报,2010,23(8):1173-1177.
- [8] 吕涛,朱清新,张路桥.一种基于 LEACH 协议的改进算法[J].电子学报,2011,39(6):1405-1409.
- [9] 张爽,王潜平,戴靠柱.无线传感器网络中分区分簇路由协议的设计[J].计算机工程与设计,2011,32(4):1220-1222.
- [10] 蒋阳,孙柳林,敖文钧.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.
- [11] Wendi B Heinzelman, Anantha P Chandrakasan, Hari Balakrishnan. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks[J].IEEE Transactions on Wireless Communications,2002,1(4):660-670.
- [12] 王伟超,代增全,徐启建.LEACH 协议簇头选择算法的改进[J].无线电工程,2010,40(3):1-3.
- [13] 钟斌,邹毅松,李思敏.一种新颖的 LEACH 簇头选举算法[J].计算机系统应用,2011,20(2):216-218.
- [14] 康一梅,李志军,胡江.一种低能耗层次型无线传感器网络拓扑控制算法[J].自动化学报,2010,36(4):543-549.



王丙元(1968-),男,辽宁朝阳人,博士,副教授,研究方向为故障诊断及网络测控技术,bywang@cauc.edu.cn;



张晶晶(1985-),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络应用,yousuozi@163.com。