

# WSN铀尾矿库核污染监测GAF交圆改进型路由

余修武, 张 枫, 范飞生, 周利兴, 叶勇军, 郭 倩

(南华大学环境保护与安全工程学院 湖南 衡阳 421001)

**【摘要】**在对铀尾矿库进行监测时,无线传感器优于传统的有线布置,但由于能量受限,在路由传输中必须高效地使用能量。该文在分析LEACH和GAF算法的基础上,提出了一种基于GAF交圆结构的改进型路由算法(IC-GAF)。利用节点地理位置信息与相交圆的结构模型来划分虚拟圆,在虚拟圆内根据剩余能量和节点与中心的距离来选举簇头,簇头从下一接收簇头或中转节点中选择最优的下一跳节点传输数据,最终将数据传输到基站。仿真表明,IC-GAF能有效的降低节点能耗,延长网络寿命。

**关键词** 节点能耗; 路由算法; 铀尾矿库; 无线传感器网络

中图分类号 TN92

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.06.005

## An Improved Routing Algorithm Based on Intersecting Circle and GAF for Uranium Tailings Nuclear Pollution Monitoring in WSN

YU Xiu-wu, ZHANG Feng, FAN Fei-sheng, ZHOU Li-xing, YE Yong-jun, and GUO Qian

(Environmental Protection and Safety Engineering Institute, University of South China Hengyang Hunan 421001)

**Abstract** In monitoring for uranium tailing, wireless sensor network (WSN) is superior to traditional line layout. Due to energy constraint, it is necessary to use energy efficiently in routing. After analyzing low energy adaptive clustering hierarchy (LEACH) and geographical adaptive fidelity (GAF) algorithms, an improved routing algorithm based on intersecting circle and GAF is proposed. It uses location information of nodes and intersecting circle model to separate monitoring areas into a grid of circle. Cluster heads selection is carried out with surplus energy and distance to the virtual circle center. And, cluster heads choose the most optimal next hop to transmit information. The simulation results show that the algorithm can balance energy consumption effectively and extend network lifetime.

**Key words** energy consumption; routing algorithm; uranium tailing; wireless sensor network

铀尾矿砂含有的放射性核素会随着雨水浸入地下和水中,或渗出矿坝,其放射性污染范围广,危害具有隐蔽性,因此对铀尾矿库放射性污染的监测十分必要<sup>[1]</sup>。当前铀尾矿监测主要采用人工或有线监测,需耗费大量人力与成本,且不易扩展。无线传感网络(WSN)在污染检测、应急指挥、智能交通等监控领域具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>,能够实时动态的对环境进行数据采集分析,具有自组织性、可移动、放置灵活等特点,能较好地解决铀尾矿监测中传统的有线布设问题,但其能量受限,故降低数据传输路由能耗是无线传感器网络的关键。

LEACH<sup>[4]</sup>协议在随机轮选簇头时,没有考虑节点的剩余能量和通信距离等因素,以致节点能耗的不均匀导致部分节点过早死亡。许多文献提出了相

应的改进型协议,比如采取多跳通信方式,由簇头将邻居簇头的数据转发给Sink节点,解决通信能耗过大的问题。然而距离Sink节点较远的簇头需要邻居簇头来进行数据转发,导致离Sink节点近的簇头承担较多的工作,消耗过多的能量,产生“热区”现象<sup>[5-7]</sup>。文献[8]结合通信距离和节点当前能量两个因素来选簇头,对于靠近基站的普通节点可在唤醒时间内充当路由节点,与簇头节点一同形成在最后一跳的多条路径选择。文献[9]提出一种基于信号制制的能量感知地理路由算法,使得位于空洞边界节点的邻居节点轮流承担转发功能,避开空洞边缘中能量相对较低的热区节点,均衡热区能量消耗。

GAF<sup>[10]</sup>算法是基于节点地理位置的分簇算法,按虚拟单元格划分簇易于操作,但随机选择簇头,

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2017-05-23

基金项目: 湖南省重点研发项目(2015SK2005); 湖南省教育厅科研重点项目(15A161); 江西省自然科学基金(20122BAB201050); 江西省科技厅科技支撑项目(20121BBG70065); 江西省教育厅科技项目(GJJ12667)

作者简介: 余修武(1976-),男,博士,副教授,主要从事无线传感器网络、智能安全监控方面的研究。

没有考虑节点的剩余能量，由簇头承担着网络中大部分的数据处理和通信工作。文献[11]采用单跳和多跳通信相结合的方式，构造虚拟簇头来承担数据的转发。文献[12]在蜂窝结构的基础上将监测区域划分为圆形，并将重叠区域作为中转区域。以上算法应用于长带状的轴尾矿库坝监测中还不够完善。

综上所述，针对轴尾矿坝体的带状结构，本文提出一种基于GAF交圆结构的改进型路由算法(intersecting circle-GAF, IC-GAF)。通过划分虚拟圆，在簇头竞争过程中提高剩余能量大和距离虚拟圆中心近的节点成为簇头的概率，簇头向基站传输数据时，在热区附近动态地选择簇头或重叠区域中的某一节点来中转，以此平衡热区簇头在数据传送过程

中的能量消耗，延长网络寿命。

## 1 网络模型

### 1.1 监测网络构建

监测区域为轴尾矿坝的坝面，坝体坡面为倾斜平面，由平整的石块砌成，可将监测区域视为一个带状的二维平面。该网络的布置为一个节点非均匀分布的模型，节点部署在一个带状的监测区域内收集数据，如图1所示，网络模型中采集的数据通过簇头传输到基站，在簇头跟基站通信时，可通过选择最优的下一跳接收节点进行多跳向基站发送信息，从而均衡网络的耗能。

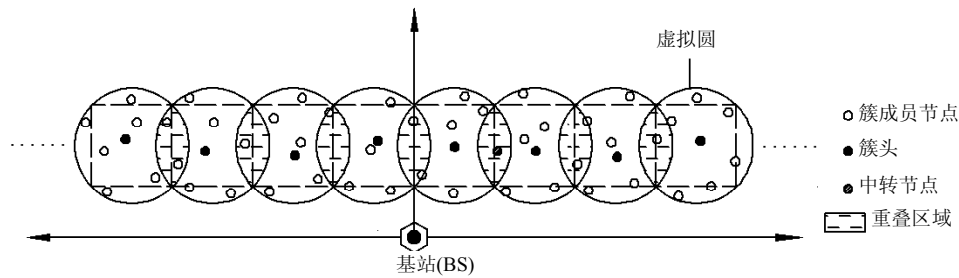


图1 轴尾矿坝监测网络拓扑结构

### 1.2 条件设置

- 1) 设在对该段坝体监测时有唯一的基站，基站为有线供电，能量不限。
- 2) 监测区域中布置了 $N$ 个节点，能量相同且有限。所有节点通过相关定位算法可获知自身位置信息，此过程消耗的能量，在此不予考虑。
- 3) 节点具有计算和数据存储转发能力。
- 4) 节点只将监测数据转发给所在簇的簇头。

## 2 IC-GAF算法

### 2.1 虚拟圆的划分

在GAF算法中，将监测区域划分为若干个正方形单元格，如图2a所示。GAF对监测区域的划分要求相邻两个单元格内的任意节点能够直接通信，相邻单元格节点间的最远距离 $x$ 应小于通信阈值距离 $d_0$ ，即 $x \leq d_0$ ，有利于减少节点的通信能耗。正方形结构模型中的边长 $a$ 与 $x$ 关系：

$$a = x / \sqrt{5} \tag{1}$$

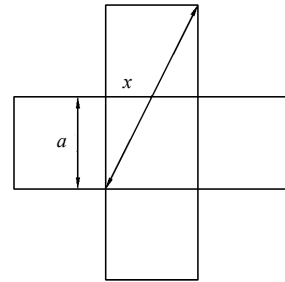
正方形单元格的面积 $S_{\square}$ 为：

$$S_{\square} = \frac{1}{5} x^2 \tag{2}$$

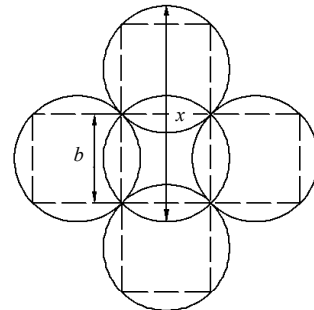
在IC-GAF中，则使用相交圆结构模型，如图2b所示，要使相邻的虚拟圆中任意两个节点能保持通

信，相邻簇头间的最远距离 $x$ 小于 $d_0$ ，即 $x \leq d_0$ 。相交圆结构模型中的边长 $b$ 与 $x$ 应满足：

$$b = x / (1 + \sqrt{2}) \tag{3}$$



a. 正方形



b. 相交圆

图2 结构模型

虚拟圆单元的面积 $S_{\circ}$ 为：

$$S_0 = \frac{\pi}{16} \left( 1 + \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+1} \right)^2 x^2 \quad (4)$$

综上可得:

$$\frac{S_0}{S_{\square}} \times 100\% \approx 135\% \quad (5)$$

IC-GAF相交圆结构模型与GAF正方形单元格结构相比,增加了每个单元的面积和单跳信号覆盖面积,在网络中节点密度不变的情况下,明显可以增加虚拟单元中的节点个数,即存在节点共享(中转节点)。

在监测平面区域内选定基站的位置为参考点,建立平面直角坐标系,将监测区域划作若干个正方形,每个正方形的中心为圆心,正方形的对角线长度为直径作外接圆,并把虚拟圆编号。按地理位置信息将节点划入相应的圆内。

### 2.2 簇头竞选

簇头越靠近虚拟圆的中心,整个网络中簇头分布位置会更均匀。选择能量高的节点成为簇头也有利于延长簇的寿命。设定簇头竞选系数用于判断虚拟圆内节点成为簇头的可能性。

簇头竞选系数为:

$$q_i = \frac{E_{si}}{(1 + d_{ic}^2)(E_{\max} - E_a)} \quad (6)$$

式中,  $E_{si}$ 表示某节点的剩余能量;  $E_{\max}$ 表示当前轮簇内节点剩余能量的最大值;  $E_a$ 表示当前轮簇内节点的平均能量;  $d_{ic}$ 表示节点到虚拟圆中心的距离。 $q_i$ 越大节点成为簇头的概率就越大。

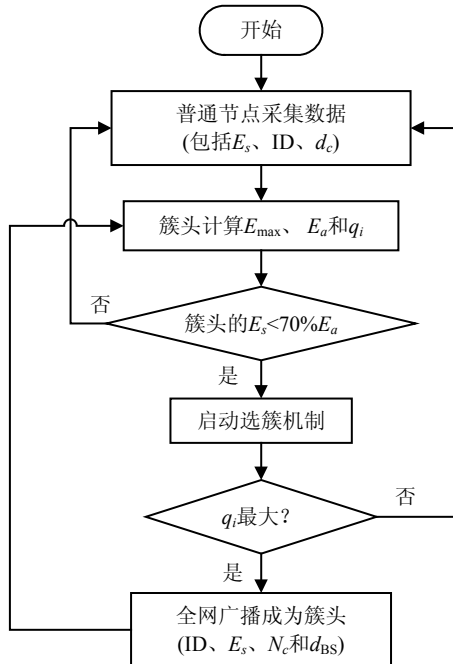


图3 簇头竞选流程图

在新算法初始化时最接近虚拟圆中心位置的节点为簇头,后续簇头竞选具体过程如图3所示。

当簇头发现自身能量低于竞选时 $E_a$ 的70%时则进入重新选取簇头的状态。簇头接收来自簇成员节点的数据包并进行计算处理,得出当前 $E_{\max}$ 、 $E_a$ 和 $q_i$ ,选取 $q_i$ 最大的节点作为新的簇头。当选为簇头的节点向全网广播一条消息,包括簇头节点ID、 $E_{si}$ 、簇内成员节点数量 $N_c$ 和其到基站的距离 $d_{i-BS}$ 。簇内成员节点进入睡眠状态,只定期将自身的状态信息和监测到的数据发送给簇头节点(time division multiple address, TDMA),直到簇头轮换再进入发现状态。

### 2.3 中转节点

若节点位于相交圆结构中的重叠区域,则称为中转节点,如图4所示。节点根据位置信息判断所在虚拟圆 $i$ 。初始簇头向其簇内成员节点广播包含簇头的地理位置信息及ID的RTS(request-to-send)数据包,簇内成员节点在正确接受到RTS数据包以后判断自己是否位于重叠区域。

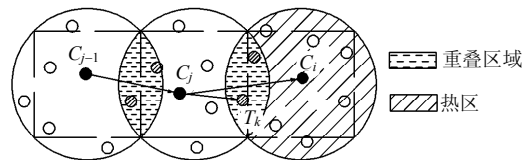


图4 中转节点

若自身同时接收到距离小于虚拟圆半径的两个簇头的RTS数据包,则可确定其位于相交圆结构中的重叠区域 $I$ ,该节点向包含 $I$ 的所有虚拟圆 $i$ 的簇头 $C_i$ 发送报文(ID,  $E_{si}$ ,  $I$ ,  $i$ )。相应簇头存储该报文信息,记录与之产生重叠的虚拟圆编号以及中转节点 $T_k$ 。

### 2.4 数据传输

簇头到基站的路径建立使用贪婪算法,从 $C_i$ 和 $T_k$ 中选择最优的节点来传输数据。簇头 $j$ 下一跳接收节点集合表示为:

$$A_j = C_i \cup T_k = \{i | d_{i-BS} < d_{j-BS}\} \cup \{k | d_{k-BS} < d_{j-BS}\} \quad (7)$$

式中,  $i$ 表示簇头 $j$ 的下一跳簇头;  $d_{j-BS}$ 表示簇头 $j$ 到基站的距离;  $d_{k-BS}$ 表示中转节点 $T_k$ 到基站的距离。

由于网络中所有的数据都要经过邻近基站的簇头节点,会形成热区,热区内的簇头多次将数据转发给基站,所以该区域能量消耗速度最快,若热区内节点的能量耗尽,网络中的数据就无法发送给基站,热区判定系数表示为:

$$\Phi = \frac{d_{j-BS}}{d_0} \quad (8)$$

当 $\Phi < 1$ 时,簇头 $j$ 与基站直接通信,也可判断该

簇头 $j$ 位于热区内。当 $\Phi \geq 1$ 时,簇头 $j$ 从其下一跳接收节点集合 $A_j$ 中选择下一跳节点。

若簇头 $j$ 的下一跳簇头 $i$ 位于热区,则可选出中转节点用于协助簇头将接收到的数据转发给基站,中转节点可以分担簇头传输数据的能耗,延长簇的生存时间,如图4所示,下一跳接收节点在集合 $A_j$ 中确定,选取 $\tau$ 最小值的节点作为下一跳节点,传输路径系数为:

$$\tau = \alpha \frac{E_0}{E_{sj}} + \beta \frac{d(A_j, BS)}{d_0} \quad (9)$$

式中, $\alpha$ 和 $\beta$ 表示权重因子,且 $\alpha > \beta$ ,  $\alpha + \beta = 1$ ;  $E_0$ 表示节点初始能量; $d(A_j, BS)$ 表示集合 $A_j$ 中节点到基站的距离。节点剩余能量越大及其到基站的距离越近,则 $\tau$ 越小,其成为下一跳的概率越大。

IC-GAF算法数据上传具体步骤为:

1) 簇成员在给定的时隙内(TDMA)将采集的数据单跳传送至簇头。

2) 簇头根据自己与基站的距离计算热区判定系数 $\Phi$ ,若 $\Phi \geq 1$ ,则进入下一步,否则进入步骤5)。

3) 簇头从储存的节点信息表中,对 $i \in A_j$ 中的节点计算其 $\tau$ 值,选择 $\tau$ 值最小的节点作为下一跳节点。

4) 重复执行步骤3)直到 $\Phi < 1$ 。

5) 簇头将数据包直接发送到基站。

下行查询或控制信息,由基站直接广播给其覆盖的某段坝体整个网络的各个簇头(基站较高且发射功率较大),各簇头再向下转发给其成员节点,构成两级下行数据传输路由。

### 3 仿真模拟与性能分析

#### 3.1 能量模型

节点接收 $l$  bit数据时所消耗的能量为:

$$E_R(l) = lE_{elec} \quad (10)$$

式中, $l$ 表示发送数据的大小; $E_{elec}$ 表示发送单位数据电路的能耗。

节点 $A$ 把长度为 $l$  bit的数据发给相距 $d$ 的节点 $B$ 的耗能为:

$$E_T(l, d) = \begin{cases} E_R(l) + l\varepsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ E_R(l) + l\varepsilon_{amp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\varepsilon_{fs}$ 表示在自由空间模型下的衰减系数; $\varepsilon_{amp}$ 表示在多路径模型下衰减系数; $d_0$ 表示通信距离阈值:

$$d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs} / \varepsilon_{amp}} \quad (12)$$

#### 3.2 算法分析

以虚拟圆中心(0,0)为参考点,并在此布置一个

节点,在虚拟圆边缘布置4个节点,如图5所示。

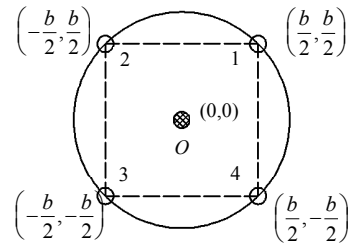


图5 簇头位置

若选择虚拟圆中心的节点 $O$ 为簇头,节点1、2、3、4分别发送 $l$  bit数据包给 $O$ ,消耗的能量为:

$$E = 8E_R(l) + 2l\varepsilon_{fs}b \quad (13)$$

若选择节点1为簇头,节点2、3、4、 $O$ 分别发送 $l$  bit数据包给节点1,消耗的能量为:

$$E = 8E_R(l) + \frac{7}{2}l\varepsilon_{fs}b \quad (14)$$

比较式(13)与式(14)得知,选择靠近虚拟圆中心的节点消耗的能量明显更少。

簇头接收并发送 $n$ 次 $l$  bit数据包,其消耗的能量为:

$$E = 2nE_R(l) + l\varepsilon_{fs} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (15)$$

当 $n$ 特别大时, $E$ 的大小主要由 $l\varepsilon_{fs} \sum_{i=1}^n d_i^2$ 决定,选择靠近虚拟圆中心的节点为簇头会使得 $d_i$ 近似相等,有利于均衡全网能耗。

#### 3.3 仿真结果

为了验证IC-GAF算法在铀尾矿坝的长带状结构的监测应用效果,在相同的长带状场景下,与LEACH及GAF算法对比。假设通信信道理想,节点发送的消息丢失及错误忽略不计,采用MATLAB仿真软件,实验中运用到的参数如表1所示。

表1 参数设置表

基本参数	取值
监测区域/m <sup>2</sup>	30×300
节点初始能量/J	0.5
节点数量	100
$\varepsilon_{fs}$ /pJ·bit <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>	10
$\varepsilon_{amp}$ /pJ·bit <sup>-1</sup> ·m <sup>-4</sup>	0.001 3
$E_{elec}$ /nJ·bit <sup>-1</sup>	50
广播包/bit	100
数据包/bit	4 000

节点平均剩余能量 $\bar{E}_s$ 为算法循环工作一定轮次后取其簇节点的剩余能量的平均值。仿真结果如图6所示,在前241轮,IC-GAF的 $\bar{E}_s$ 略低于GAF算法,这主要是因为IC-GAF算法要完成最优簇头的选

举和虚拟圆的划分, 消耗了一定的能量。但经过一定时间后, 由于簇间采用多跳路由与基站通信, 并且考虑到簇头的剩余能量, 节点平均剩余能量就高于LEACH和GAF协议。LEACH在第844轮时  $\bar{E}_s$  为零, 而此时IC-GAF的  $\bar{E}_s$  接近0.3 J(60%); 第1 200轮时GAF的  $\bar{E}_s$  约0.15 J(15%), 而IC-GAF的  $\bar{E}_s$  约为0.25 J(25%)。IC-GAF的  $\bar{E}_s$  从总体上来说高于LEACH和GAF, 初期引起开销的操作平衡了能量, 随着时间的推移展示出了其优势。

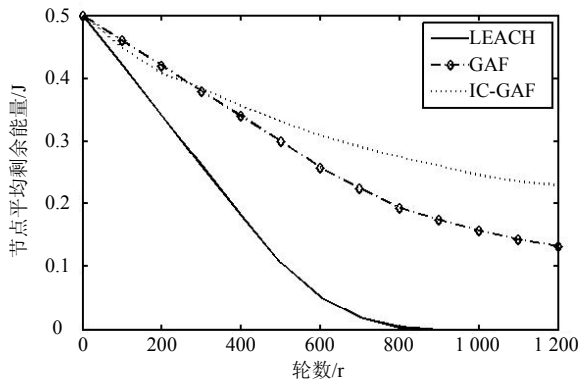


图6 节点平均剩余能量

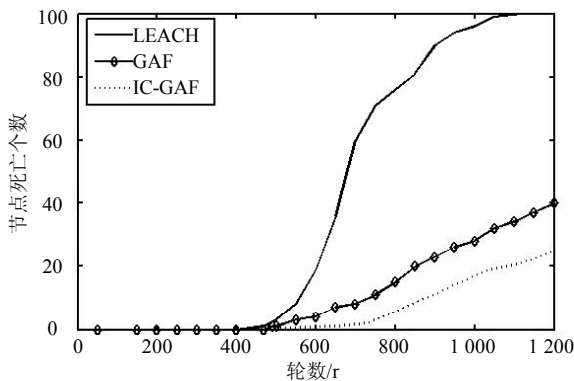


图7 节点死亡个数

图7表示节点死亡个数与轮数的关系, LEACH的第一个节点死亡和全部节点死亡分别出现在第468轮和第1 117轮, 时间跨度为649轮。GAF算法的第一个节点死亡出现在第490轮, 第1 200轮时死亡了40个节点(约40%), 而IC-GAF算法的第一个节点死亡出现在第650轮, 第1 200轮时死亡了25个节点(约25%), 可以得知IC-GAF有效地延长了网络的存活时间。主要是由于LEACH中的簇头是直接和基站通信, 能耗较大; GAF的簇内节点可以休眠和切换状态, 又能一定的降低能耗; IC-GAF算法改进了簇头竞选机制, 降低了成簇的次数, 以节点平均剩余能量来衡量是否更换簇头, 每一轮选取虚拟圆内剩余能量大且接近圆中心的节点为簇头, 并考虑到了到基站的传输距离, 使得能量消耗更加均衡。

由于簇头的能耗占整个网络能耗中最主要的部分, 仿真时, 记录每一轮簇头运行消耗的能量总和。随机选择10轮, 结果如图8所示。发现LEACH协议簇头能量消耗最高, GAF次之。LEACH算法簇头以单跳的方式传输数据与基站直接通信, 而且在成簇过程中, 选择的簇头也多于IC-GAF。从图8中可以看出, IC-GAF簇头的能量消耗趋势更加稳定, 相比LEACH与GAF都有所减少, 因此能量更加均衡。

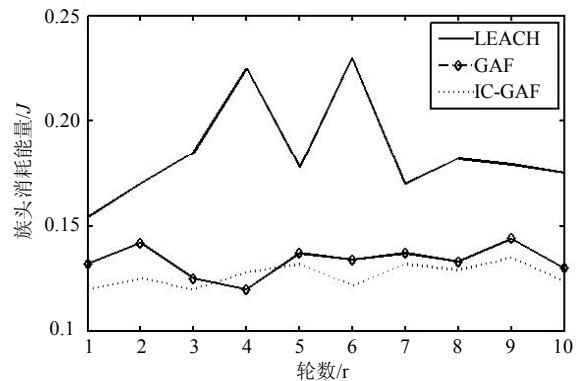


图8 簇头消耗能量

### 4 结束语

针对铀尾矿坝放射性污染的监测, 提出了一种基于GAF交圆结构的改进型路由算法(IC-GAF)。先将监测区域划分为若干个虚拟圆, 在圆内选择簇头。采用优化的多跳路由选择机制, 并在路径的最后一跳, 结合距离与剩余能量来选择最优节点, 平衡了簇间负载。仿真结果表明IC-GAF算法符合铀尾矿坝长带状的网络环境, 有效解决了WSN的“热区”问题, 均衡了网络能量消耗, 延长了网络的生存时间。

### 参 考 文 献

[1] KAYZAR T M, VILLA A C, LOBAUGH M L, et al. Investigating uranium distribution in surface sediments and waters: a case study of contamination from the juniper uranium mine, stanislaus national forest, CA[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, 136: 85-97.

[2] XU G, SHEN W, WANG X. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: a survey[J]. Sensors, 2014, 14(9): 16932-16954.

[3] 邹赛, 汪文勇, 唐勇, 等. 在动态水环境中基于熵的无线传感器网络路由算法[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(1): 82-87.

ZOU Sai, WANG Wen-yong, TANG Yong, et al. Routing algorithm of wireless sensor network based on entropy standard in dynamic water environment[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(1): 82-87.

(下转第840页)

- linearizer[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2013, 23(4): 211-213.
- [8] ALLEN K, ROGER D. Characteristics and modeling of passive MESFETs for non-linear control applications[C]// *Microwave Symposium Digest*. San Diego, USA: IEEE, 1994: 437-440.
- [9] 胡欣, 王刚, 王自成, 等. 一种场效应管预失真电路对改善行波管非线性的作用[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(4): 951-955.  
HU Xin, WANG Gang, WANG Zi-cheng, et al. Improvement of TWT nonlinearity with a field effect transistor predistortion circuit[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(4): 951-955.
- [10] ADEL A, SALEH M. Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1981, 29(11): 1715-1720.
- [11] ELDAR Y C. Universal weighted MSE improvement of the least-squares estimator[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(5): 1788-1800.
- [12] VILLEMAZET J F, PERREL M, BROUSSE D, et al. New wide band advanced predistortion lineariser for space applications[C]// *Microwave Conference*. Munich, Germany: IEEE, 2013: 44-47.

编辑 税红

-----  
(上接第829页)

- [4] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// *Hawaii International Conference on System Sciences*. Hawaii: IEEE, 2000.
- [5] LIU A, ZHANG D, ZHANG P, et al. On mitigating hotspots to maximize network lifetime in multi-hop wireless sensor network with guaranteed transport delay and reliability[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2014, 7(3): 255-273.
- [6] BANDARA H M N D, JAYASUMANA A P, ILLANGASEKARE T H. A top-down clustering and cluster-tree-based routing scheme for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2011(1550-1329): 272-280.
- [7] 孙彦清, 彭舰, 刘唐, 等. 基于动态分区的无线传感器网络非均匀成簇路由协议[J]. *通信学报*, 2014(1): 198-206.  
SUN Yan-qing, PENG Jian, LIU Tang, et al. Uneven clustering routing protocol based on dynamic partition for wireless sensor network[J]. *Journal on Communications*, 2014(1): 198-206
- [8] 蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 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, 34(5): 1222-1232.
- JIANG Chang-Jiang, SHI Wei-Ren, TANG Xian-Lun, et al. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2012, 34(5): 1222-1232.
- [9] 赵湘宁. 一种基于信号机制的能量感知地理路由算法[J]. *电子学报*, 2015, 43(5): 965-973.  
ZHAO Xiang-ning. A signal mechanism based energy-aware geographic routing algorithm[J]. *ACTA Electronica Sinica*, 2015, 43(5): 965-973.
- [10] XU Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Geography-informed energy conservation for Ad Hoc routing[J]. *ACM Mobicom*, 2001, 3(3): 70-84.
- [11] JAHAN M S, SALI A, USAHA W, et al. Comparison and analysis of energy-efficient geographical and power based clustering algorithm for heterogeneous WSNs[J]. *International Journal of Information & Communication Technology*, 2013, 3(9): 1-8.
- [12] YANG Z J, WANG Y, ZHAO F M, et al. An improved clustering algorithm based on intersecting circle structure[C]// *2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*. [S.l.]: IEEE, 2012: 622-625.

编辑 叶芳