

小麦农田无线传感器网络能量高效数据汇集方法

孙浩然^{1,2}, 赵春江^{2,3*}, 吴华瑞^{2,3}, 缪祎晟^{2,3}, 于合龙¹

(1. 吉林农业大学信息技术学院, 长春 130118; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

摘要:小麦农田无线传感器网络是实现小麦变量施肥、灌溉决策、病虫害防控等农业精准作业的重要基础, 针对小麦农田监测环境供电不便、环境复杂造成的无线传感器网络动态变化、监测周期短等问题, 从能耗优化的角度研究提出了一种面向小麦农田的高能效无线传感器网络拓扑关联簇首轮换方法(Topology based Energy-efficient Cluster-head Rotating Scheme for wireless sensor networks in wheat fields, TECRS)。该方法根据节点剩余能量、拓扑位置和节点度等多个因素综合计算簇首竞争权值, 优先选择剩余能量高、节点度大、距汇聚节点近的传感器节点成为簇首, 以提高节点的能量使用效率并延长网络寿命。最后为解决传统分簇算法中簇首频繁轮换开销大的问题, 通过改变进行簇首选取的周期, 对比算法在不同轮换周期下的平均能耗与网络寿命, 确定最优的簇首轮换频率。仿真实验结果表明, 每9轮数据上传进行1次簇首轮换时, TECRS算法在网络生命周期与节点能量均衡方面达到最优, 此时网络生命周期约为LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)的2倍, 是EEDRCP(Energy Efficient Double Rounds Clustering Protocol)与LUCR(A Layer-based Unequal Clustering Routing Protocol)算法的1.3倍, 且较三种算法有着更好的能耗均衡性能, 更适用于能量受限的小麦农田无线传感器网络监测应用。

关键词:小麦农田; 无线传感器网络; 路由算法; 簇首选取; 能耗均衡; 簇首轮换

中图分类号: S24; TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)01-0129-07

Energy Efficient Data Collection Method for Wireless Sensor Network in Wheat Field

SUN Haoran^{1,2}, ZHAO Chunjiang^{2,3*}, WU Huarui^{2,3}, MIAO Yisheng^{2,3}, YU Helong¹

(1. College of information Technology Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097; 3. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Wheat field wireless sensor network is an important basis for realizing agricultural precision operation such as wheat variable fertilization, irrigation decision-making, pest control and other. Aimed at the problems of dynamic changes in wireless sensor networks and short monitoring cycles due to inconvenient power supply for monitoring the wheat farmland and complicated environment. A Topology based energy-efficient cluster-head rotation Scheme for wireless sensor networks in wheat fields (TECRS) was proposed from the perspective of Energy consumption optimization. In this method, the competitive weight of cluster heads was calculated based on the residual energy, topological position, node degree and other factors; and the sensor nodes with high residual energy, large node degree and close to the sink node were selected as the cluster heads in order to improve the energy use efficiency of nodes and extend the network life; finally, in order to solve the problem of high overhead of frequent rotation of cluster heads in traditional clustering algorithm, by changing the cycle of cluster head selection, comparing the average energy consumption and network life of the algorithm under different rotation cycles, the optimal frequency of cluster head rotation was determined. The simulation results show that when the first round of cluster change was carried out every 9 rounds of data upload, the network life cycle and node energy balance of the TECRS algorithm were opti-

收稿日期: 2020-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61871041); 北京市自然科学基金项目(4172024); 江苏大学农业装备学部项目(4111680005)

作者简介: 孙浩然(1995-), 男, 在读硕士, 研究方向: 农业无线传感器网络。

通讯作者: 赵春江, 男, 博士, 研究员, E-mail: zhaocj@necita.org.cn

mal. The network life cycle was about 2 times of Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy(LEACH), 1.3 times of Energy Efficient Double Rounds Clustering Protocol(EEDRCP) and A Layer-based Unequal Clustering Routing Protocol(LUCR), and the energy balance performance of the three algorithms was better, which was more suitable for the monitoring of wheat field wireless sensor network with limited energy Application.

Key words: Wheat field; Wireless Sensor Network; Routing algorithm; Cluster heads selection; Energy consumption balance; Cluster heads rotation

基于物联网、人工智能等技术的精准农业是目前农业发展的新潮流与方向^[1-2],在小麦农田中应用物联网技术实时获取农作物生长区域的环境信息可为小麦变量施肥、灌溉决策、病虫害防控等农业精准作业提供实时可靠的数据支撑,对于提升小麦产量、降低农业污染都有着积极的促进作用^[3]。相较于传统精准农业系统,无线传感器网络因其无线采集传输、布设维护方便、成本低、自组网、鲁棒性高等特点十分适用于无基础设施条件的小麦农田环境监测应用。

在小麦农田环境监测无线传感器网络应用条件中,存在种植区域偏远供电不便,区域地势条件复杂、网络节点电池能量有限等实际问题^[4-5],如何进行高效的网络数据汇集,延长网络可靠监测时间是小麦农田无线传感器网络监测应用中亟待解决的问题。网络路由协议可有效提升网络能量使用效率、平衡节点间能耗差异,是提高节点存活率、增加网络生命周期的重要技术手段之一^[6]。分簇型路由协议按照簇结构对网络节点进行划分,灵活的组织方式相比传统平面型路由更加适用于小麦农田等复杂环境下的动态网络,但成簇方式在很大程度上影响了网络的能耗与寿命^[7]。本文拟从分簇型路由协议能耗优化角度开展研究,通过改进簇首选取过程,动态优化网络结构,进而均衡节点间的能耗差异,延缓节点死亡速度,以满足小麦农田无线传感器网络长时间稳定监测的需求。

1 相关工作

分簇型路由协议以分簇的方式选取少量簇首管理协同其他普通节点,网络有着较好的扩展性,并且周期性簇首轮换的方式有效降低了簇首和普通节点间的能耗差异,在数据传输阶段,簇首通过数据融合减少数据冗余与网络传输中的数据量,降低了监测节点与终端节点数据汇集中的能量消耗。分簇型路由协议对于延长能量约束严格的应用场景下无线传感器网络稳定、监测时间可靠有着不错效果^[7-9]。

W.R.Heinzelman 等率先提出了划分网络结构

以均衡节点能耗的 LEACH 算法 (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy),通过周期性随机生成簇首的方式解决了传统平面型路由算法中节点能耗不均的问题^[10-11]。陈庆章等^[12]提出了一种双轮成簇的路由算法 EEDRCP (Energy Efficient Double Rounds Clustering Protocol),该算法以 2 轮数据上传所需时间作为网络的一个工作周期,并在奇数轮通过当选簇首次数与能量选取簇首,偶数轮当前簇首转为普通节点,并在簇结构不变的情况下,由剩余能量最大的簇内节点成为簇首。EEDRCP 算法在均衡网络能耗与减少算法成簇开销上效果较为明显。洪薇等^[13]提出了一种基于簇内节点间距与剩余能量进行权值计算以此完成簇首竞争的路由算法 LUCR (A Layer-based Unequal Clustering Routing Protocol)。该算法在保证簇首有足够能量进行正常工作的前提下,以节点度与邻居节点间相对位置的限制,使簇首位于簇中心的同时缩短簇内通信距离,通过减少簇内通信能耗的方式延长了网络生命周期。

针对小麦农田无线传感器网络监测持续时间短、基础设施薄弱、能量供给困难、节点分布随机等特点,小麦农田场景下的无线传感器网络在网络生命周期、节点间能耗均衡性上对路由协议有着更高的要求,已有的分簇型路由算法无法照搬应用于小麦农田网络监测这一全新场景^[14]。本文拟从均衡网络负载与延长网络生命周期的角度出发,提出计算权值的簇首竞争方式与固定间隔的簇首轮换方法,以实现小麦农田网络监测下网络负载均衡与节点的低能量损耗。

2 节点度与距离加权的簇首选取方法

2.1 系统模型

根据小麦农田的种植特点^[15-16],定义网络模型如下:(1)在一块 $M \times M$ 的小麦农田中,布置了 N 个传感器节点;(2)所有传感器都具有环境监测、数据融合及消息上传的功能;(3)传感器电池能量有限且无法补充;(4)汇聚节点位置固定不可移动;(5)覆盖区域内所有传感器间皆可进行数据

传输;(6)传感器可根据通信距离自行调节发射功率。

本文采用文献[17]的无线传感器网络通信能耗模型,距离为d的两个传感器之间传输k比特数据的发送能耗为:

$$E_{tr} = \begin{cases} k \times E_{ele} + k \times \varepsilon_{fs} \times d^2, & d < d_0 \\ k \times E_{ele} + k \times \varepsilon_{mf} \times d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \dots\dots (1)$$

传感器接收k比特数据的能耗为:

$$E_{re} = k \times E_{ele} \dots\dots\dots (2)$$

其中, E_{tr} 是传感器节点一次数据传输的总能耗, E_{ele} 是数据处理所需的能量。 ε_{fs} 、 ε_{mf} 分别为两种模型中功率放大所需要的能耗系数, d_0 是网络通信过程中的距离阈值。

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mf}}} \dots\dots\dots (3)$$

2.2 TECRS 算法

本文提出一种拓扑关联的高能效小麦农田无线传感器网络簇首轮换方法(Topology based Energy-efficient Cluster-head Rotating Scheme for wireless sensor networks in agricultural wheat fields, TECRS),该算法的簇首通过节点的相对位置信息及剩余能量动态的选择,以减少低能量节点的额外能耗,达到均衡网络负载的目的,并在此基础上通过模拟小麦网络监测模型以仿真实验进行对比的方式,确定了该算法的最佳簇首轮换周期。

TECRS算法总体上分为簇首选取、数据上传与簇首轮换三个阶段^[18-19]。采用两次竞争的方式来完成簇首选取。首先根据节点剩余能量进行判断,筛选能量优势节点进行二次竞争,即节点剩余能量大于平均剩余能量的节点。在第二次簇首竞争中,综合节点度、节点位置信息(即节点与终端节点的相对距离)及剩余能量三个参数计算竞争权值,选取相邻节点中权值最高的节点作为簇首。完成簇首选取后,其余节点选择最近的簇首入簇,成簇完成后网络立即开始数据采集与上传。为解决传统簇首轮换算法频繁轮换使算法开销较大的问题,提出一种多轮间隔簇首轮换方法,以簇首连任的方式减少簇首轮换的通信及算法开销。TECRS算法的网络拓扑结构示意图见图1。

2.2.1 多参数加权簇首选取

在网络初始化完成后,网络中的节点将自身的剩余能量、位置等信息以广播方式向竞争区域内的节点进行发送。由于小麦农田中布设的无线传感器网络属于静态网络节点度。将同一区域内剩余能量高于平均值的节点标记为候选簇首进入

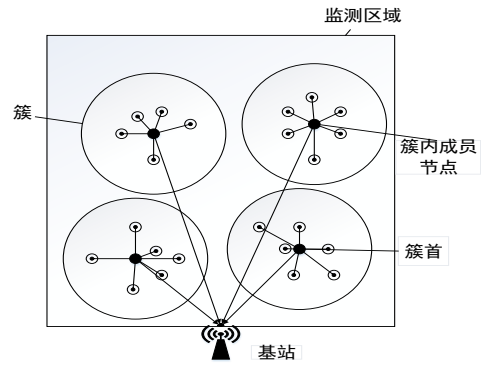


图1 网络拓扑结构示意图

第二次竞争,其他低能量节点则放弃簇首竞争进入休眠状态,等待簇首发送成簇消息。成为候选簇首的节点将获取的节点度、相邻节点位置和自身能量信息暂时存在传感器内部的邻居信息表内。

TECRS算法在簇首选取中优先选择剩余能量较高的节点成为簇首,防止低能量节点当选簇首后因承担额外通信能耗而过早死亡。在能量优势节点中,算法从拓扑位置角度选择节点度高、距离汇聚节点更近的节点当选簇首,在相同情形下减少簇内及簇首到汇聚节点的通信能耗。簇首竞争权值的计算方式如下:

$$W(i,r) = a \times \frac{N(i,r) - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} + b \times \frac{E(i,r) - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} + c \times \frac{D_{max} - D_{min}}{d(i,sink) - D_{max}} \dots\dots\dots (4)$$

式中, $W(i,r)$ 为簇首竞争权值, i 为传感器编号, r 为网络运行轮次, a 、 b 、 c 为加权因子, $E(i,r)$ 是第 r 轮节点 i 的剩余能量值, E_{max} 与 E_{min} 分别是当前全网节点中剩余能量的最大值与最小值。 $N(i,r)$ 表示 i 的节点度, N_{max} 与 N_{min} 分别是当前轮次网络中节点度的最大值与最小值; $d(i,sink)$ 是 i 与汇聚节点间的通信距离, D_{max} 和 D_{min} 分别为当前网络中节点间最远与最短的数据传输间距。

完成簇首竞争权值 $W(i,r)$ 的计算与广播后,竞争区域内权值最高的节点成为簇首,并广播成簇消息。普通节点选择距离最近的簇首加入,以此减少簇内通信能耗。当节点与多个簇首的通信距离相同时,选择加入成员数目较少的簇,以实现簇首额外能耗的均衡。至此整个网络的成簇过程完成,进行数据传输汇集后转入休眠状态以等待下一轮采集周期被唤醒。为避免簇首能量过快消耗死亡,本文采用一种多间隔簇首轮换方式均衡簇首额外转发能耗。TECRS算法流程图见图2。

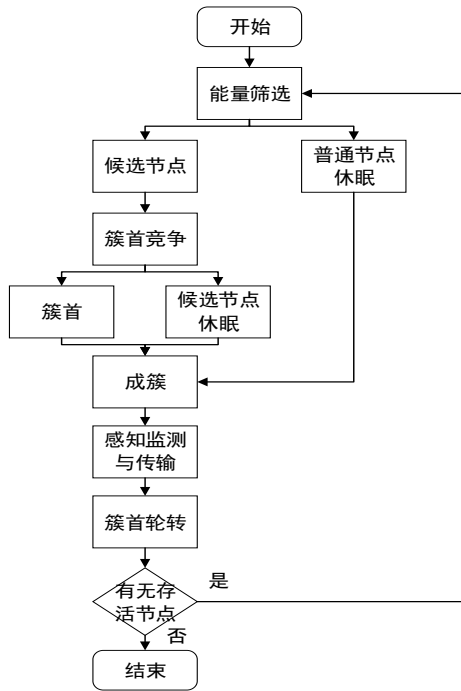


图2 TECRS 算法流程图

2.2.2 多轮间隔簇首轮换方法

传统簇首轮换方法每进行1次数据采集需要进行1次簇首选取来均衡簇首承担的额外能耗。簇首轮换虽然可提高节点间的能耗均衡性,但是每次簇首轮换选取也伴随着大量的通信与算法开销,在能量供给困难的小麦农田无线传感器网络监测中如果能减少一些簇首轮换次数,则可将该过程消耗的能量节约下来用于网络监测与数据传输。由此本文通过增大簇首轮换间隔的方式减少簇首轮换的次数,以期获得更少的算法开销,从而延长网络的生命周期;但簇首轮换间隔周期过大,也会造成当前簇首能量过度消耗死亡,导致网络拓扑结构遭到破坏,最终影响小麦农田网络监测的质量与生命周期。为此,本文在仿真实验中从网络能量均衡性与生命周期两方面对比不同簇首轮换间隔的算法性能,得出了TECRS算法的最佳簇首轮换周期。

3 仿真结果及性能分析

3.1 仿真环境及指标参数

3.1.1 网络仿真参数

为了验证TECRS算法的性能,选取网络生命周期、节点剩余能量标准差、轮节点平均能耗三个性能指标参数进行仿真实验分析。仿真参数设置见表1^[20-23]。

3.1.2 性能指标参数

(1)网络生命周期

表1 网络仿真参数

参数	值
sink 节点坐标	[50, 100]
节点数目 N	100 个
监测范围 M×M	100 m×100 m
权值因子 a,b,c	0.4/0.3/0.3
距离常数 d ₀	87 m
初始能量 E ₀	0.5 J
发射能耗 E _{ele}	50 nJ/bit
接收能耗 E _{rc}	50 nJ/bit
功率放大系数 e _{fs}	10 pJ/bit/m ²
功率放大系数 e _{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
控制包长度 L _m	100 Byte
数据包长度 L _d	500 Byte

网络生命周期表征的是网络稳定监测与传输的时间,是衡量小麦农田无线传感器网络质量的重要性能指标。本文将网络开始工作到节点死亡数目达总节点数目的30%这一段时间视为网络稳定工作阶段,定义其为网络生命周期 T。

(2)轮节点平均能耗

定义每轮数据上传中节点总能耗的平均值为轮节点平均能耗 E_r。

$$E_r = \frac{1}{Alive_r} \times \left[\sum_{i=1}^N E_r(i) - \sum_{i=1}^N E_{r+1}(i) \right] \dots\dots\dots (5)$$

其中 Alive_r 是第 r 轮存活节点的数目, E_r(i) 是第 r 轮中节点 i 的剩余能量值。

(3)剩余能量标准差

网络剩余能量标准差代表着节点能量的离散程,标准差越大,网络能量负载均衡性差。定义网络剩余能量标准差 σ(r) 如下:

$$\sigma(r) = \sqrt{\frac{1}{Alive_r} \sum_{i=1}^{Alive_r} [E_r(i) - E_r]^2} \dots\dots\dots (6)$$

E_r 是第 r 轮存活节点的平均剩余能量。

3.2 仿真实验与结果分析

通过仿真实验的方式对算法性能进行对比与分析。首先从不同簇首轮换周期对TECRS算法性能的影响进行对比。将不同间隔簇首轮换的TECRS算法命名为TECRS-R, R是簇首轮换的周期。

TECRS-R 算法网络生命周期对比图见图3。6种方法的存活节点个数随轮次增长均呈现出由相对稳定到逐步下降的变化趋势,其中TECRS-11、TECRS-13的下降趋势较为缓慢,能量均衡性较差,其他方法下降的较为集中。并且随着簇首

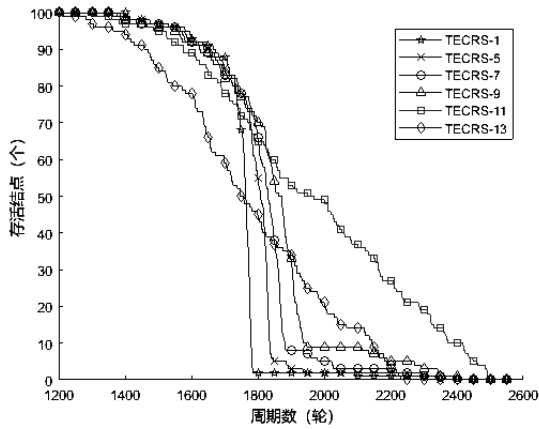


图3 TECSR-R算法网络生命周期对比图

轮换间隔的增大,TECSR-5、TECSR-7、TECSR-9的生命周期较TECSR-1有所延长,但TECSR-11与TECSR-13的生命周期则开始变短。其中TECSR-9对生命周期提升最为明显,约为1860轮,是TECSR-1的1.06倍。由图3可以看出,9轮间隔进行簇首轮换时,网络生命周期最大。

图4比较了TECSR-R算法的节点剩余能量标准差变化情况。由图4可以看出,6种方法中的能量标准差随轮次的增长均呈现先上升后下降的趋势,但TECSR-1的曲线明显低于其他方法,其后依次是TECSR-5、TECSR-7、TECSR-9、TECSR-11、TECSR-13,说明TECSR-1算法通过连续的簇首轮换使网络的能耗较为均衡,同时也造成了较多的算法能耗开销,网络生命周期较短。TECSR-5、TECSR-7、TECSR-9通过增大簇首轮换间隔,减少簇首轮换次数,提高了节点能量有效性,并以降低一定的能耗均衡性为代价延长了生命周期。TECSR-11与TECSR-13由于簇首轮换间隔过大在网络生命周期与能量均衡性上均出现了明显的下降趋势。

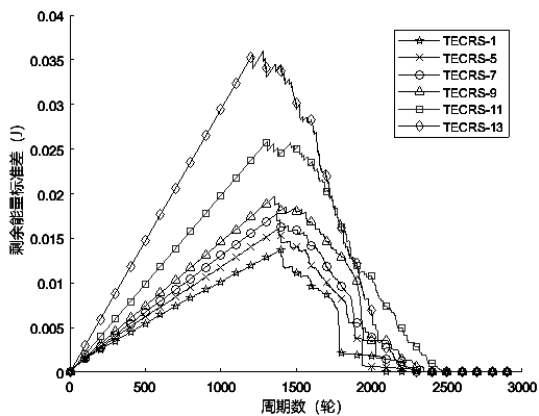


图4 TECSR-R算法节点剩余能量标准差

经过结果分析,TECSR-9算法在损失较小的网络能量均衡性为代价下,延长了网络生命周

期,证明每9轮数据上传进行1次簇首轮换的TECSR算法可以有效地延长网络生命周期,更适合应用于能量约束严格的小麦农田无线传感器网络监测应用中。因此本文选取9轮间隔作为TECSR算法的簇首轮换周期,并与LEACH、EEDRCP、LUCR算法进行了性能比较。

图5比较了TECSR算法与LEACH、EEDRCP及LUCR算法的网络生命周期。如图5所示,4种算法的存活节点数均呈现出由相对稳定到逐步下降的趋势,其中TECSR算法的稳定阶段持续的最久,其次分别是LUCR、EEDRCP、LEACH算法。其中LEACH的生命周期约为900轮,EEDRCP与LUCR约为1450轮,TECSR算法约为1860轮。如果以网络生命周期来衡量路由协议的性能,TECSR算法的性能分别是LEACH的2倍,是EEDRCP和LUCR算法的1.3倍,TECSR的节点死亡更加集中,网络能耗均衡性更好。并且TECSR算法1860轮左右的生命周期也基本上达到了小麦农田无线传感器网络长时间监测的应用需求。

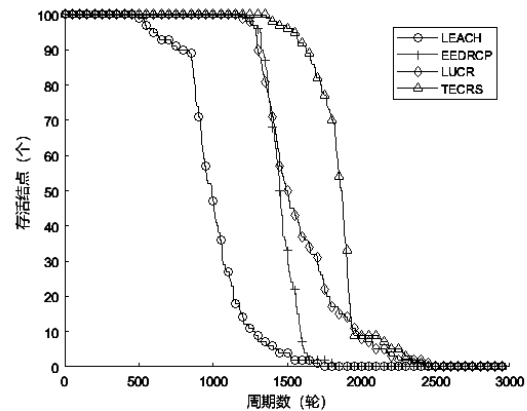


图5 4种算法相同轮数节点死亡情况

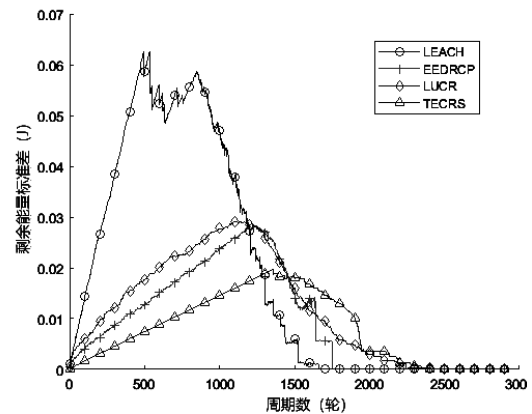


图6 4种算法节点剩余能量标准差对比图

图6对比了4种不同算法的剩余能量标准差。4种算法的剩余能量标准差变化曲线随轮次总体上呈逐渐上升至最大值再下降的趋势,TECSR算

法的剩余能量标准差最小,其次分别是EEDRCP、LUCR与LEACH协议。其中,LEACH随机簇首选取方式可能导致部分节点因连续担任簇首而过快消耗能量死亡,因此上升与下降持续时间较短且变化迅速;LUCR算法以降低簇内能量开销的方式,使能量标准差较LEACH有所下降,曲线的整体变化趋势较缓;EEDRCP协议通过奇偶双轮成簇的方式减少了网络成簇开销,网络能耗均衡性进一步得到提升;TECRS算法在网络生命周期内标准差曲线变化缓慢且波动较小,说明采用多种因素计算权值进行簇首竞争的方式,可以使网络能耗较为均匀地分配到每一个节点,均衡了网络负载。对于能量受限严重的小麦农田网络监测应用而言,TECRS算法使网络节点的能量得到了充分利用,提高了节点的能量使用效率。

图7比较了4算法轮节点平均能耗的变化情况。可以看出4种算法的轮节点能量消耗均大致呈现出由相对稳定到逐步下降的变化趋势,其中LEACH协议由于周期性的随机簇首选取使网络簇结构随轮次而变化,造成了网络的通信能耗每轮都会发生较大改变,较其他算法每轮网络能耗最大且波动起伏较大;EEDRCP协议以奇偶2轮进行1次簇首轮换的方式减少了成簇开销,每轮节点的平均能耗较少且波动较小;LUCR算法以能量作为约束进行簇首竞争,并降低了簇内通信的能耗水平,但能量波动变化趋势仍然较大;TECRS算法由于减少了簇重构次数与算法开销,无论是节点平均能耗,还是平均能耗的波动都比其他3种算法小,提升了网络能量的有效性和均衡性。

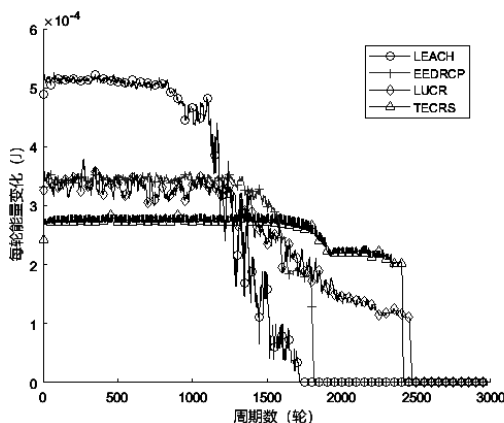


图7 轮节点平均能量消耗

4 结 论

本文提出一种能量高效的小麦农田无线传感器网络数据汇集方法,通过参数加权簇首选取与

多轮间隔簇首轮换机制降低与均衡节点能耗。仿真实验结果表明,算法提高了监测网络能量使用效率,均衡了网络负载,达到了延长小麦农田无线传感器网络生命周期的设计目的,对于其他能量受限的农业复杂环境网络监测应用中也有着一定的使用价值。但单纯的分簇型路由算法适用于一些规模较小的应用场景,当网络监测范围增大时,该类算法的监测质量也有不同程度的降低,因此如何在大规模小麦农田监测网络中实现与终端节点高效、可靠的数据传输是后续主要研究方向。

参考文献:

- [1] 张波,罗锡文,兰玉彬,等.基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J].农业工程学报,2015,31(17):176-182.
- [2] 蒋丹,董欣.无线传感器网络在环境监测系统中的研究与应用[J].环境与发展,2018,30(3):166,168.
- [3] 李新伟,田敏,肖新.基于小麦养分快速诊断的施肥决策与控制系统设计[J].东北农业科学,2019,44(2):23-27.
- [4] 任志玲,张广全,林冬,等.无线传感器网络应用综述[J].传感器与微系统,2018(3):1-2.
- [5] 杨文平,胡喜巧.浅论农业信息技术及其发展态势[J].东北农业科学,2010,35(1):61-64.
- [6] Chen X, Yin X, Yu B, et al. Communication Channel Reconstruction for Transmission Line Differential Protection: System Arrangement and Routing Protocol[J]. Energies, 2016, 9(12): 893.
- [7] 徐晶晶,张欣慧,许必宵,等.无线传感器网络分簇算法综述[J].计算机科学,2017,44(2):31-37.
- [8] Yuxing M, Huiyuan Z, Dongmei Y. Weak node protection to maximize the lifetime of wireless sensor networks[J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 2018, 29(4): 693-706.
- [9] 常铁原,刘伟娜,张炎,等.基于簇头距离和能量的优化LEACH协议[J].河北大学学报(自然科学版),2019,39(2):194-200.
- [10] 陈静静,刘三阳,丁毓.基于罚函数方法的Leach协议[J].数学的实践与认识,2019(7):144-151.
- [11] 吕涛,朱清新,张路桥.一种基于LEACH协议的算法改进[J].电子学报,2011,39(6):1405-1409.
- [12] 陈庆章,赵小敏,陈晓莹.提高无线传感器网络能效的双轮成簇协议设计[J].软件学报,2010,40(11):2933-2943.
- [13] 洪薇,胡健,龚代圣,等.一种基于层次的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J].计算机与现代化,2012(12):80-84.
- [14] 秦成华.云计算在我国农业信息服务系统中的应用与策略[J].东北农业科学,2014,39(5):93-96.
- [15] 吴华瑞,赵春江,张海辉.农田无线传感器网络中的簇首轮换机制[J].农业工程学报,2009,25(2):170-174.
- [16] 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,2016,34(5):1222-1232.
- [17] Hematkah H, Kaviani Y. DCPVP: Distributed Clustering Protocol Using Voting and Priority for Wireless Sensor Networks[J].

- Sensors, 2015, 15(3): 5763–5782.
- [18] 陈娉婷,官波,沈祥成,等.大数据时代开放式农业信息知识库构建研究[J].东北农业科学,2018,43(5):64–68.
- [19] Zhang D, Li G, Zheng K, et al. An Energy-Balanced Routing Method Based on Forward-Aware Factor for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 766–773.
- [20] 刘伟,杜佳鸿,贾素玲,等.能量有效的无线传感器网络分簇路由协议[J].北京航空航天大学学报,2019,45(1): 53–59.
- [21] Tarhani M, Kavian Y S, Siavoshi S. SEECH: Scalable Energy Efficient Clustering Hierarchy Protocol in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(11): 3944–3954.
- [22] 陈晓娟,王卓,吴洁,等.一种基于LEACH的改进WSN路由算法[J].传感技术学报,2013,26(1):116–121.
- [23] 陈伟宏,李仁发.无线传感器网络仿真技术综述[J].控制工程,2014(2):149–155.

(责任编辑:王丝语)

(上接第128页)在进行综合加工和高值化利用时应充分考虑其口感、风味及其抗氧化活性物质与其活性功能间的关系,建议云南主产区优先选用比洛克西品种发展大规模种植和深加工,从而获得更高的经济效益^[11]。

4 结 论

本研究采用生理生化试验方法,测定云南主栽6个不同品种蓝莓成熟果实中可滴定酸和类黄酮、总酚、总花色苷等抗氧化活性物质含量,进而对其体外抗氧化活性进行评价研究。6个品种中,比洛克西可滴定酸、类黄酮、总酚、总花色苷含量最高。分别比夏普蓝高47.4%、118.81%、121.16%和2556.50%;其体外抗氧化活性评价结果表明,比洛克西对DPPH自由基的清除能力最强,浓度为0.8 mg/mL时,清除能力为56.8%;对ABTS⁺自由基清除能力最好,浓度为1.0 mg/mL时,清除能力为88.7%;对OH⁻自由基的清除能力最强,浓度为1.0 mg/mL时,清除能力为90.4%;6个品种蓝莓果实类黄酮、总酚、总花色苷含量与DPPH自由基、ABTS⁺自由基和OH⁻自由基清除率间均存在正相关关系,且相关性均达到极显著水平($P<0.01$)。综上可知,比洛克西蓝莓果实可滴定酸含量较高,且抗氧化能力比其他5个品种强,品质优良,适宜进行综合加工和高值化利用。

参考文献:

- [1] 刘翼翔,吴永沛,刘光明,等.野生蓝莓酚酸成分鉴定及其清除细胞内自由基活性研究[J].中国食品学报,2015(12): 173–179.
- [2] 谢国芳,王瑞,周笑犁,等.蓝莓花色苷稳定性研究进展[J].北方园艺,2016(7):190–194.
- [3] 程佑声,王鸿飞,许凤,等.蓝莓皮渣花色苷提取及抗氧化活性的研究[J].果树学报,2015,32(4):696–704.
- [4] Somerset S M, Johannot L. Dietary flavonoid sources in Australian adults[J]. Nutrition and Cancer, 2008, 60: 442–449.
- [5] Hosseinian F S, Beta T. Saskatoon and wild blueberry have higher anthocyanin contents than other Manitoba berries[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2007, 55: 10832–10838.
- [6] 孙晶.3个蓝靛果品种生物活性物质含量及抗氧化性的比较[J].经济林研究,2019,37(3):95–98.
- [7] Gong J, Huang J, Xiao G, et al. Antioxidant capacities of bamboo shaving extract and their antioxidant components[J]. Molecules, 2016, 21(8): 996.
- [8] 林恋竹,赵谋明.反应时间对DPPH·法、ABTS⁺·法评价抗氧化性结果的影响[J].食品科学,2010,31(5):63–67.
- [9] Liu X, Chen Y, Wu L, et al. Optimization of polysaccharides extraction from Dictyophora indusiata and determination of its antioxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 103(4): 175.
- [10] 谢国芳,谢笔钧,孙智达,等.蓝莓酒渣、果、酒中花色苷成分鉴定及酒渣与果中花色苷抗氧化活性比较[J].食品科学,2016,37(2):165–171.
- [11] Wada L, Ou B. Antioxidant activity and phenolic content of Oregon caneberrries[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2002, 50: 3495–3500.
- [12] Zheng W, Wang S Y. Oxygen radical absorbing capacity of phenolics in blueberries, cranberries, chokeberries, and lingonberries [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2003, 51: 502–509.
- [13] 朱金艳,王月华,张建丽,等.不同品种蓝莓果的营养成分及花色苷种类研究[J].新农业,2016(9):10–14.

(责任编辑:王昱)