

能量高效的农田无线传感器网络拓扑关联路由算法*

孙想^{1,2} 吴保国¹ 吴华瑞^{2,3} 缪祎晟^{2,3} 李庆学^{2,3}

(1. 北京林业大学信息学院, 北京 100083; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 农业部农业信息技术重点开放实验室, 北京 100097)

摘要: 针对农田无线传感器网络节点分布不均、能量约束严格等特点, 提出了一种能量高效的簇头选择方法 TBCS-EA, 在以剩余能量进行簇头选择的基础上根据节点拓扑位置、拓扑密度等进行加权, 使距离 sink 较近的节点与密集区节点大概率成为簇头, 提高成簇能量使用效率。针对现有成簇算法频繁进行簇头选举, 算法开销大等问题, 提出了一种能量逼近式簇头轮换机制, 节点连续担任簇头并以某一目标进行能量逼近, 在达到逼近目标后进行根据簇内信息指定新簇头, 减少簇头选择的次数与协议开销。仿真与实验结果表明, TBCS-EA 算法的网络生命周期约为 LEACH 的 2.2 倍, CHCS 的 1.5 倍, 从节点能量曲线看能耗均衡效果与 CHCS 相当, 明显优于 LEACH。结果显示 TBCS-EA 综合性能较之于现有算法有明显提升。

关键词: 农田 无线传感器网络 网络拓扑 路由协议 能耗优化

中图分类号: TP393.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0232-07

Topology Based Energy Efficient Routing Algorithm in Farmland Wireless Sensor Network

Sun Xiang^{1,2} Wu Baoguo¹ Wu Huarui^{2,3} Miao Yisheng^{2,3} Li Qingxue^{2,3}

(1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Aiming at the problems in farmland wireless sensor networks such as uneven nodes distribution, strict energy constraint, etc., a topology based routing algorithm TBCS-EA was proposed. Cluster heads were selected by considering the residual node energy and the node topology parameters, such as node position and density. This strategy made the nodes in an intensive area or close to the sink has a higher possibility to become a cluster-head, which could improve the network power efficiency. Existing clustering algorithms elect cluster head frequently, which will bring extra power consumption. An energy approximation scheme was also included in the algorithm. A node kept as cluster head until its residual energy reached the energy approximation target, then another node was selected as the new cluster head by using the topology based scheme. By doing this, the protocol cost could be significantly reduced. The simulation and experiment results showed that the network life span of TBCS-EA was more than 2200 rounds, which was about 1.5 times of CHCS and 2.2 times of LEACH. According to the node energy curve, the node energy balance of TBCS-EA was much better than that of LEACH, and it was almost like CHCS. The overall performance of TBCS-EA was better than that of the existing methods of LEACH and CHCS.

Key words: Farmland WSN Network topology Routing protocol Power optimization

收稿日期: 2014-11-01 修回日期: 2015-01-09

* 国家自然科学基金资助项目(61271257)和北京市农林科学院青年科研基金资助项目

作者简介: 孙想, 博士生, 国家农业信息化工程技术研究中心副研究员, 主要从事农业信息化和森林经理研究, E-mail: sunx@nercita.org.cn

通讯作者: 吴保国, 教授, 博士生导师, 主要从事农村与农业信息化和森林经理研究, E-mail: wubg@bjfu.edu.cn

引言

近年来基于无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)的环境监测应用已十分普及,在农业领域,利用 WSN 对农田环境实时监测也已成为精准农业生产监控中的最有效方法之一^[1-4]。路由协议是 WSN 网络层的核心技术,传统的泛洪路由协议简单、易实现,无需进行网络拓扑信息的建立与维护,但数据通过不同的传输路径到达汇聚节点,产生大量的数据交叠,造成网络通信能力的巨大浪费,网络整体通信效率低下,随着网络规模的逐渐扩大,信道拥塞严重,网络的通讯能力、端到端延时等也急剧下降。无线自组织网络在基于提高服务质量(Quality of service, QoS)和网络公平性方面提出了许多协议与改进方法^[5]。对于大规模农田无线传感器网络应用场景,主要存在网络规模大、节点分布不均、能耗限制严格、节点能量多级异构等问题,且农田环境监测数据量相对较少,对于数据传输时延的要求也较为宽松,所以研究农田无线传感器网络路由算法时解决的首要问题是降低和均衡节点能耗^[6-12]。

对于无线传感器网络节点而言,绝大部分的能耗集中在数据无线传输上,且无线传输能耗与单跳通信距离呈指数关系^[7,13]。为此,本文从网络拓扑构建与路由调度的角度研究如何降低与均衡能耗,提出一种 TBCS - EA (Topology based cluster-head switching - Energy approximation) 算法,并与 LEACH、CHCS 等现有算法进行比较,最后通过仿真对几种算法的性能进行评估。

1 TBCS - EA 算法

1.1 系统模型描述

1.1.1 网络模型

大规模农田无线自组织网络应用中存在网络规模大、节点分布不均、总体监测时间长、信道条件复杂、节点分布不均、能量约束严格等特点^[12]。相对于水下和设施温室等场景,大田无线传感器网络的网络规模大,信道条件更为复杂多变,导致了网络拓扑频繁变化,对路由算法也提出了更高要求。大田场景与果园场景在无线信道上的变化特征较为类似,但由于果树株距大,方便采集感知设备以支架形式放置,减小植物对信号传播的遮挡,而大田作物种植密集,支架会占用种植面积或对作物造成显著影响,所以大田无线传感器网络监测节点体积一般较小,无线信号易被作物遮挡。且大田作物苗期与成熟期变化大,易对无线信号的遮挡造成明显区别。以上特点使得在大田建立网络模型时需要区别对

待。假定有 N 个传感节点随机地被部署在一个 $X \times Y$ 的二维矩形大田区域内,同时假定该无线传感器网络具有如下性质^[13-15]: ① 网络属于密度较高的静态网络,即传感节点部署后位置保持不变,节点密度足以保证网络连通性以及监测区域的覆盖度。② sink 节点位于监测区域的几何中心位置,位置固定且唯一,其无线发射功率可控且能量不受限制。③ 传感节点类型同构,初始能量均相同为 E_0 ,且不能补充。④ 传感节点每轮消耗的能量不一定相同,即能量异构。⑤ 传感节点发射功率可控,均有能力直接与 sink 节点通信,可分为簇内通信模式与簇间通信模式。⑥ 节点具有自我能量感知能力,可获得剩余能量数据。⑦ 节点具有数据融合能力。

1.1.2 能耗模型

选用文献[16]的无线通信能耗模型,节点发送 l 比特数据需要消耗的能量 E_{tx} 为

$$E_{tx} = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_f d^2 & (d < d_{crossover}) \\ lE_{elec} + l\epsilon_m d^4 & (d \geq d_{crossover}) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $d_{crossover} = \sqrt{\frac{\epsilon_f}{\epsilon_m}}$

式中 E_{elec} ——发射电路或接收电路传输 1 bit 数据消耗的能量

d ——发射节点到接收节点之间的距离

$d_{crossover}$ ——模型的距离阈值

ϵ_f, ϵ_m ——两种模型中功率放大能量系数

若 $d < d_{crossover}$, 则为自由空间衰减模型,若 $d \geq d_{crossover}$, 则采用多路衰减模型。

同理,节点接收 l 比特数据需要消耗的能量 E_{rx} 为

$$E_{rx} = lE_{elec} \quad (2)$$

由式(1)可得,在近距离通信时,传输衰减能耗与距离呈平方关系,而在远距离通信时则与距离呈 4 次方关系。因为簇内通信频繁且数据量大,应使其适用于式(1)的自由空间衰减模型,所以定义最大簇内通信半径为 $d_{crossover}$ 。

1.2 网络拓扑关联簇头选择

现有方法中成簇机制一般以概率成簇或是基于节点能量权重的成簇。LEACH 等算法随机选择簇头,则可能造成簇头分布不均,在大规模网络中还会出现网络连通性无法保证的问题;而 CHCS 等基于剩余能量的簇头选择方法,虽然局部能量最优的唯一性可使避免簇头集中,选出的簇头可能以较大概率出现在节点密集区域边缘,造成能量使用效率不高。本文提出一种网络拓扑关联的簇头选择思想,在簇头选择时不仅考虑节点能量同时还要考虑节点

所在区域的节点所处的网络拓扑位置,所在区域拓扑密度大的节点有更高的优先级成为簇头,使簇头分布与节点密度分布规律相吻合,充分发挥成簇路由对于集群节点效率高的优势。如图1a所示,簇头位置在网络拓扑密集区的中心,即高密度位置,簇内节点接入的通信距离均较小,簇头的簇内通信半径为 r_1 ;相对图1b所示,簇头位置在网络拓扑密集区的边缘,即低密度位置,簇内节点接入簇头的通信距离相对较大,簇头簇内通信半径为 r_2 ,显然 $r_2 > r_1$ 。由此可以看出,选择所在位置拓扑密度高的节点作为簇头拥有更高的通信能耗效率。

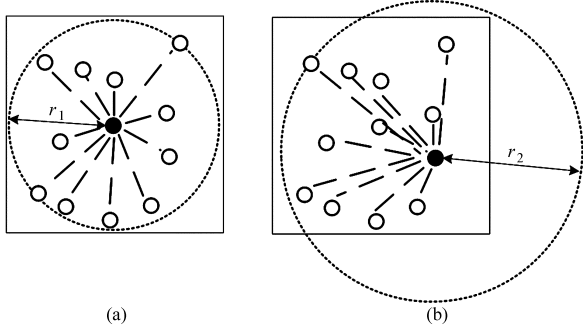


图1 拓扑位置对网络通信能量的影响

Fig.1 Impact of topological location on communication energy

具体地,网络拓扑关联的簇头选择方法在进行簇头选择时不仅仅考虑节点剩余能量因素而且考虑节点所在区域的网络拓扑位置与密度。簇头选择的权重 W_i 为

$$W_i = \left(1 + \frac{N_i}{10}\right) \frac{E_{r_i}}{\ln d_i} \quad (3)$$

式中 E_{r_i} ——节点 i 的剩余能量

N_i ——节点 i 所在区域拓扑密度指标,其值为节点 i 以 $d_{crossover}$ 为通信半径时的节点度

按照式(3)的计算方法,所在区域拓扑密度高的节点将有更高的优先级成为簇头,在该部分节点能量相对充裕时保证网络整体拥有较高的能量使用效率。

1.3 能量逼近式簇头轮换

现有研究中成簇协议簇头选择每轮进行一次,需要收集各节点信息并经过投票选举得出,选举过程信息交互多次,虽然保证节点间能耗均衡的效果较好,但造成大量算法开销^[17-19]。而且对于能量异构网络易出现某一能量优势节点连续成为簇头或是某几个节点轮流成为簇头的情况。如图2所示,开始阶段节点 N_a 剩余能量远高于其他节点,连续多轮被选为簇头,当节点 N_a 能量降低至与节点 N_b 相当时,由于簇头能耗较大,所以本轮未承担簇头角色的

节点次轮剩余能量较高,所以节点 N_a 、 N_b 交替成为簇头。

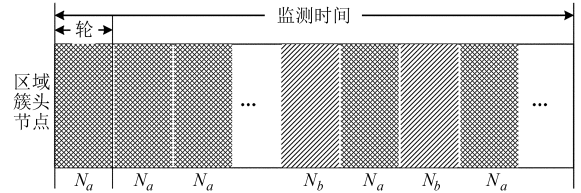


图2 区域内簇头轮换示意图

Fig.2 Cluster head switching order diagram

对于图2所示情况,不必每轮均进行簇头选择,文献[20]也提出了奇数轮进行簇头选择的算法。每轮进行簇头选择虽然可以保证监测过程每一轮所有节点的能量都尽可能平均,但频繁的簇头选择也带来了明显的算法开销。提出的TBCS- EA算法中采用一种能量逼近式簇头轮换方法,该方法的思路是将原有频繁簇头轮换中分散的簇头时间合并。比如按现有方法节点 N_a 总共需要在 n 轮中担任簇头,那么在TBCS- EA算法中则使节点 N_a 一次或分几次连续担任簇头,减少簇头轮换的次数。通过簇头轮换的减少,则不必每轮进行复杂的簇头选举,进而可节约大量的算法能耗开销。

当某节点成为簇头,收集一次簇内节点剩余能量信息,根据簇内节点信息按一定规则确定簇头的能量逼近目标,由该簇头持续担任簇头角色直至簇头剩余能量小于或等于逼近目标时,该节点不再担任下一轮次的簇头,由当前簇头收集簇内节点信息后根据1.2节中的方法选择并指定成为下一轮的簇头节点。具体如下:

(1)网络初始化时,根据1.2节中的规则进行簇头选举,从而确定初始化的最佳簇头位置与成簇数量。

(2)当某节点 S_i 第一次当选簇头时,广播成簇消息,接收邻近节点加入,收集的簇内节点能量信息并计算能量逼近目标 T_i 后,进行正常数据上传。

(3)每轮数据上传前,簇头 S_i 均判断自身剩余能量 E_{r_i} 是否大于 T_i ,若是则进行正常数据上传,且下一轮中继续由 S_i 担任簇头,继续执行步骤(3)。

(4)若簇头 S_i 剩余能量 E_{r_i} 小于或等于 T_i ,则广播簇头预轮换消息,簇内节点在上传监测的同时还需上报各自能量信息, S_i 根据簇内节点信息按1.2节规则决定担任新簇头的节点 S_j ,下一轮 S_i 不再担任簇头。新担任簇头的节点 S_j 转至步骤(2)继续执行。

采用该方法的优势在于,通过设定能量逼近目标将现有算法中节点分散担任簇头的时间片进行有效合并,节约了频繁簇头选举带来的额外通信开销。

TBCS - EA 算法设计的理想情况是,某节点一次性连续完成整体生命周期所需要的全部轮次簇头任务,由于网络生命周期无法预知等实际问题,该理想情况不可实现。节点连续担任簇头的时间与能量逼近目标的设定紧密相关,若取簇内最高节点能量,则下一轮簇头能量必然小于逼近目标,则 TBCS - EA 算法简化为奇数轮簇头选择算法,对簇头轮换的减少效果最差。随时能量逼近目标的降低,节点连续担任簇头的时间逐渐延长。为确定逼近目标对算法性能的影响,选择了 2 种能量逼近目标,并在仿真实验环节进行性能对比分析。一般认为只有能量优势节点才可以成为簇头,从该角度出发选取簇内节点平均能量作为逼近目标。由于节点初始能量相同,节点间基础能耗差异不大,因而使用能量均值逼近目标时,在短期内高能量节点与均值能量间无法拉开距离,即在网络运行前期仍有较长时间会出现较为频繁的簇头轮换。针对此问题,另一种方案选择簇内最低节点能量作为逼近目标,由于簇头节点的高能耗,簇内最低节点能量会被迅速刷新,从而避免算法长时间无法收敛的情况。

TBCS - EA 算法在减少频繁簇头轮换的同时,带来的问题则是节点连续担任簇头能耗迅速消耗而引起的节点能耗不均衡,但从网络生命周期整体来看,只是将现有算法中分散各处的簇头时间片进行了整合,所以算法在网络运行总体时间上应具有较好的能耗均衡性能。

2 仿真结果与分析

为对 TBCS - EA 算法的性能进行验证,以仿真实验的方法将 LEACH、CHCS 以及 2 种不同能量逼近目标条件下的 TBCS - EA 算法进行了对比仿真。仿真环境采用 Matlab,参数采用文献[16]中的模型参数,主要参数如表 1 所示。

表 1 网络仿真参数

Tab. 1 Network simulation parameters

参数	数值
监测面积/(m × m)	100 × 100
汇聚节点坐标/m	(50, 50)
节点数量 N /个	100
节点初始能量 E_n /J	0.5
数据融合能耗 P_n /(nJ·b ⁻¹)	5
近距离通信能耗系数 A_{ch} /(pJ·b ⁻¹)	0.001 3
远距离通信能耗系数 A_{m} /(pJ·b ⁻¹ ·m ⁻²)	10
发送、接收电路能耗 E_{tx} 、 E_{rx} /(nJ·b ⁻¹)	50
数据包长度/ b	4 000
控制包长度/ b	100
LEACH 算法当选簇头概率 p	0.05

网络能耗性能最关注的指标为网络寿命,本文取首个节点死亡时间可以体现网络正常稳定工作的时间。

如图 3 所示,LEACH 在算法执行约 900 轮时开始出现死亡节点,这是因为 LEACH 算法采用随机簇头选择方式,距离 sink 较远的节点以及相对孤立的节点基础能耗大,却和其他节点以同一概率当选簇头,导致能量过度消耗死亡。图 3 中 CHCS 算法的首个死亡节点则出现在约 1 200 轮,是因为 CHCS 算法选取剩余能量高的节点作为簇头节点,避免了高基础能耗节点的提前死亡。但 CHCS 需要每轮搜集节点能量信息,并进行投票选举,产生了大量的算法开销,因而 CHCS 算法相比 LEACH 算法的网络生命周期延长较果并不十分显著。本仿真实验中仅从理论上考虑了选举过程中算法的数据通信开销,实际过程中由于大量节点同时投票,可能引起信道竞争而造成节点长时间监听,本仿真中认为协议数据链路层有完备的 TDMA 方式可避免此问题。对于本文提出的 TBCS - EA 算法,仿真中采用了两种不同的能量逼近目标对比,结果显示两种目标条件下 TBCS - EA 算法的网络生命周期均明显优于 LEACH 与 CHCS 算法。以簇内平均节点能量作为能量逼近目标,如图 3 中 TBCS - EA mean 所示,首个节点死亡约出现在 1 800 轮;以簇内能量最低节点的能量值作为能量逼近目标,如图 3 中 TBCS - EA min 所示,首个节点死亡约出现在 1 700 轮。从仿真结果可看出,以能量均值为逼近目标的 TBCS - EA 算法拥有更长的网络寿命。

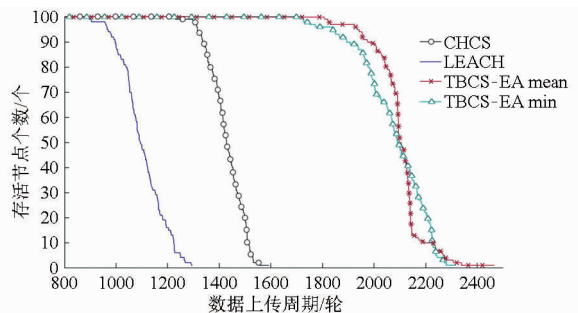


图 3 不同算法网络生命周期对比

Fig. 3 Comparison chart of network lifecycle

除了网络寿命之外,节点间能耗均衡也是无线传感器能耗优化研究的重点。一般采用 10% 节点死亡到 90% 节点死亡经过的时间来表征节点间的能耗均衡情况。这段时间越短则节点间能耗均衡性越好,从网络存活节点数量曲线上看,则相当于下降越陡,则能耗均衡性越好。从图 3 可以看出各算法 10% 节点死亡到 90% 节点死亡经过的时间,LEACH 经过约 200 轮,CHCS 经过约 100 轮,TBCS - EA min

经过约 300 轮, TBCS - EA mean 经过约 130 轮。从结果可以看出, LEACH 算法没有考虑节点间能耗均衡问题, 所以相对较差, 可 TBCS - EA mean 也不如 CHCS 的能耗均衡性好, 而 TBCS - EA min 的能耗均衡性甚至弱于 LEACH。为进一步对此现象进行解释分析, 观察仿真过程中节点能量的变化, 随机选取在同一簇内的部分网络节点进行观察。

LEACH 算法中节点剩余能量变化关系如图 4a

所示。LEACH 算法中所有节点均承担同样的簇头能耗, 所以根据自身基础能耗不同, 节点能耗以不同比例下降, 对应图 4a 中各节点能耗曲线的斜率均不相同, 曲线由同一起点开始, 随轮数增加很快发散, 最终各节点的生命周期差异也较大。此外, 图 4a 中节点 B 在 700 轮左右有明显陡降情况, 说明节点连续多轮担任簇头, 但节点 B 的整体能耗变化仍保持原有斜率。

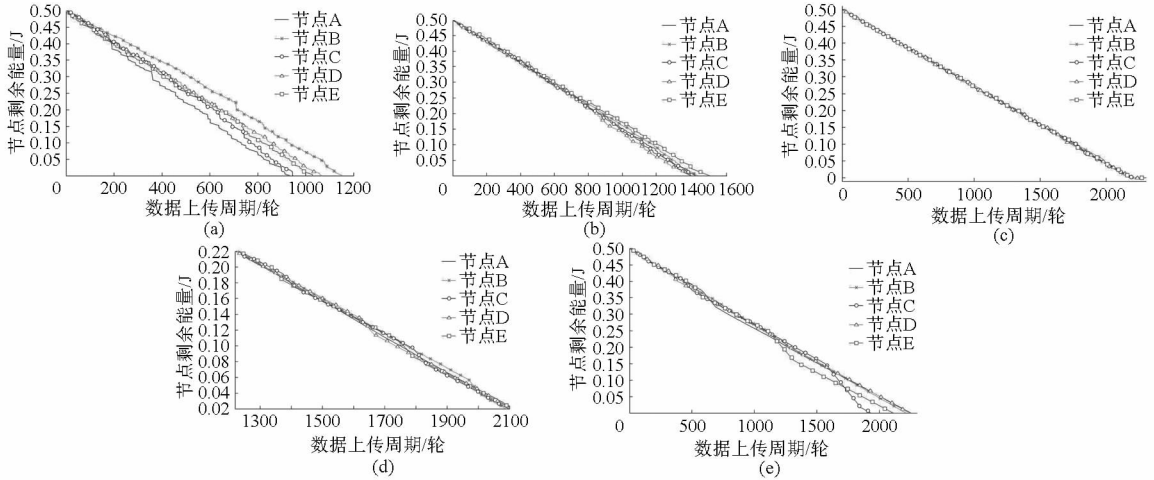


图 4 不同算法中节点剩余能量变化情况

Fig. 4 Node residual energy changes in different algorithms

(a) LEACH (b) CHCS (c) TBCS - EA mean (d) TBCS - EA mean (局部) (e) TBCS - EA min

CHCS 算法中节点剩余能量变化关系如图 4b 所示。相比图 4a, 各曲线发散情况明显减少, 最终的节点生命周期集中在一个很小的范围内。这说明 CHCS 的簇头选择使得基于剩余能量高的节点更多的承担簇头能耗, 从而将不同基础能耗节点的总能耗保持在同一水平。图 4a 中出现陡降情况在图 4b 中并未出现, 是因为 CHCS 算法每轮均选用剩余能量最多作为簇头选择标准, 所以簇头反复由剩余能量最多的节点轮流担任。从图 4b 中还可看出, 节点能耗曲线从 800 轮起开始有较明显发散, 这是因为节点初始能量相同, 高能耗节点在网络运行初期也会被选择成为簇头, 随着轮数的增加, 细小的能耗差异被逐渐累积, 而造成能耗曲线的发散。

TBCS - EA mean 算法中节点剩余能量变化关系如图 4c 所示。相比图 4a、图 4b 能耗曲线更加集中, 说明节点间的能耗更为均衡。图 4d 为图 4c 的局部放大, 从图 4d 可以看出, 不同节点先后成为簇头, 且每个节点均连续多轮担任簇头, 避免了频繁的簇首轮换。由于算法无需簇头选举, 减少了选举能耗开销, 且算法采用网络拓扑关联的簇头选择方式, 使拓扑位置具有较高能量效率的节点优先成为簇头, 使得节点平均能耗低于 LEACH 与 CHCS 算法, 这也可以从能耗曲线的整体斜率得到印证。由于

TBCS - EA 算法在簇头选择时优先考虑拓扑位置距 sink 节点近、局部拓扑密度高的节点, 所以网络运行末期出现死亡节点后, 算法的性能难以得到保证, 也造成了图 3 中存活节点曲线下降不够陡峭的问题。

TBCS - EA min 算法中节点剩余能量变化关系如图 4e 所示。从图中可以看出, 在网络运行的前期, 节点即长时间连续担任簇头, 而图 4c、图 4d 中在网络中后期才出现这种情况。这是因为能量逼近目标不同, TBCS - EA mean 算法以簇内平均能量作为逼近目标在网络前期, 因节点剩余能量较为接近, 节点担任簇头后能量迅速降低至平均能量以下, 无法长时间连续担任簇头, 前期仍有频繁的簇头轮换。TBCS - EA min 算法以最低节点能量作为逼近目标, 可在网络前期迅速拉到最高能量与最低能量间距离, 而使节点以较长时间连续担任簇头, 达到预期效果, 但由于每次以最低节点能量为逼近目标, 使得每次当选簇头的节点成为能量新低节点, 效果累计造成网络中后期部分节点曲线急剧发散, 这也是造成 TBCS - EA min 算法能耗均衡性能差的主要原因, 该问题在出现节点死亡后更为严重。

进一步地, 本文以小规模实验的方法验证 TBCS - EA 算法的实用性与有效性。以 LEACH 算法为基础, 在节点上实现了本文提出的能量逼近簇头选择

算法 TBCS - EA。实验选择在小汤山国家精准农业研究示范基地内小麦实验田中进行, 两组节点各 10 个, 采用两节干电池供电, 起始电压均为 3.4 V。一组采用 LEACH 算法, 另一组采用 TBCS - EA 算法, 以电池剩余电量作为监测指标, 在运行一段时间后监测节点电压变化。为了在较短的实验时间对算法的能耗性能进行实验与对比, 设置节点的数据上传周期为 20 s, 即每 20 s 为一轮。2 种算法的节点电压变化如图 5 所示。

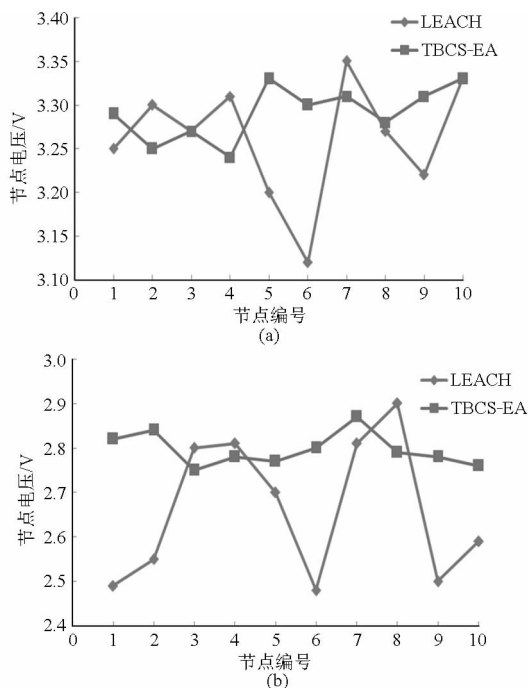


图 5 节点电压变化对比

Fig. 5 Comparison of node voltage change

(a) 2 h 后 (b) 5 h 后

由图 5a 中可以看出, 运行 2 h 后, 相当于网络完成 400 轮数据上传, LEACH 算法的已出现明显的节点间能耗不均, 而 TBCS - EA 算法的节点间电压差虽有差异但仍保持在一定范围内。当运行至 5 h 后, 如图 5b 所示, LEACH 算法已有部分节点电压低于节点可正常工作的电压下限 2.5 V 死亡, 而且最高能量节点与最低能量节点的电压差进一步扩大; 而 TBCS - EA 算法的节点电压之间的差异并没有因

为运行时间长而变大, 仍保持在一个较小的范围内, 体现出 TBCS - EA 算法较低的算法开销与良好的节点能量均衡效果。实验结果也充分印证了前文的分析与仿真结果。

综上, TBCS - EA mean 算法较 LEACH、CHCS 算法大幅提高网络能耗使用效率, 网络生命周期约为 CHCS 算法的 1.5 倍, LEACH 的 2.2 倍。节点能耗均衡性能从节点能耗变化上看优于 CHCS, 从存活节点变量曲线上看略逊于 CHCS。TBCS - EA mean 算法总体性能优于现有的 LEACH、CHCS 算法。通过实验结果可以得出 TBCS - EA 对节点间能耗均衡的效果显著好于 LEACH 算法。TBCS - EA min 算法网络生命周期优于现有算法, 虽然能耗均衡性在网络后期存在一定问题, 但算法在中前期可迅速形成连续簇头, 仍具有一定的参考价值。后续研究可考虑将能量逼近目标进行分段调整优化。

3 结束语

针对农田无线传感器网络节点分布不均及其他特点, 提出了一种网络拓扑关联的簇头选择方法, 在以剩余能量进行簇头选择时根据节点拓扑位置、拓扑密度等进行加权, 使距离 sink 较近的节点与密集区节点大概率成为簇头, 从而拥有较高的能量效率。提出针对现有成簇算法频繁簇头选择开销大的能量逼近式簇头轮换机制, 簇头在连续轮次内保持恒定, 减少了进行簇头选择的轮次, 而且由簇头收集簇内节点信息选择簇头, 避免簇头选举的频繁节点间数据交换, 减少了协议开销。仿真结果表明, 较之于现有的 LEACH 算法与 CHCS 算法, 本文提出的 TBCS - EA 算法在减少了簇头轮换的算法开销的同时, 在长期运行过程中有效保证了节点间的能耗均衡, 网络生命周期约为 CHCS 算法的 1.5 倍, LEACH 的 2.2 倍, 且设置不同能量逼近目标对比了算法性能。还通过实际大田实验的方法对能量逼近方法与 LEACH 算法进行了能耗性能对比, 结果显示能量逼近簇头选择算法实现了网络生命周期的延长与节点间能耗均衡, 达到了预期研究目标。

参 考 文 献

- 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222 - 230.
Ge Wenjie, Zhao Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agricultural internet of things [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 222 - 230. (in Chinese)
- Akyildiz I, Su W, Sanakarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393 - 422.
- 冯友兵, 张荣标, 沈敏. 面向精确灌溉的无线传感器网络构建[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 56 - 59.
Feng Youbing, Zhang Rongbiao, Shen Min. Construction of wireless sensor networks for precision irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 56 - 59. (in Chinese)
- 杨信廷, 吴滔, 孙传恒, 等. 基于 WMSN 的作物环境与长势远程监测系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 167 - 173.
Yang Xinting, Wu Tao, Sun Chuanheng, et al. Remote monitoring system of crop environment and growing based on WMSN[J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 167 – 173. (in Chinese)
- 5 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588 – 1600.
Shen Bo, Zhang Shiyong, Zhong Yiping. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1588 – 1600. (in Chinese)
 - 6 Miao Yisheng, Yuan Ling, Wu Huarui, et al. Optimization of energy heterogeneous cluster-head selection in farmland WSN[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 441: 1010 – 1015.
 - 7 Hakan Bagci, Adnan Yazici. An energy aware fuzzy approach to unequal clustering in wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(4): 1741 – 1749.
 - 8 Kemal Akkaya, Mohamed Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 3(3): 325 – 349.
 - 9 Senouci M R, Mellouk A, Senouci H, et al. Performance evaluation of network lifetime spatial-temporal distribution for WSN routing protocols[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2012, 35(4): 1317 – 1328.
 - 10 Huang Feng, Zhao Chunjiang, Li Feifei, et al. An improved farmland WSN topology based on YG and clustering algorithm[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(21): 6463 – 6468.
 - 11 Sudhanshu Tyagi, Neeraj Kumar. A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(2): 623 – 645.
 - 12 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(增刊2): 170 – 174.
Wu Huarui, Zhao Chunjiang, Zhang Haihui. Cluster head cycle-switching schemes for farmland wireless sensor networks[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2): 170 – 174. (in Chinese)
 - 13 Bara'a A Attea, Enan A Khalil. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(7): 1950 – 1957.
 - 14 Quan Wei, Zhao Futao, Guan Jianfeng, et al. An integrated link quality estimation-based routing for wireless sensor networks [J]. The Journal of China University of Posts and Telecommunications, 2011, 18(2): 28 – 33.
 - 15 李建洲, 王海涛, 陶安. 一种能耗均衡的 WSN 分簇路由协议[J]. 传感技术学报, 2013, 26(3): 396 – 401.
Li Jianzhou, Wang Haitao, Tao An. An energy balanced clustering routing protocol for WSN[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(3): 396 – 401. (in Chinese)
 - 16 洪榛, 俞立, 张贵军. 无线传感器网络自适应分布式聚簇路由协议[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1197 – 1205.
Hong Zhen, Yu Li, Zhang Guijun. An adaptive distributed clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1197 – 1205. (in Chinese)
 - 17 殷哲, 雷廷武, 董月群. 近红外土壤含水率传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 73 – 77.
Yin Zhe, Lei Tingwu, Dong Yuequn. Design and experiment of near infrared sensor for soil moisture measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 73 – 77. (in Chinese)
 - 18 Huang Feng, Zhao Chunjiang, Li Feifei, et al. A WSN routing and sleeping algorithm in agriculture intermittent data collection [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 513 – 517: 606 – 611.
 - 19 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感器研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216 – 226.
He Yong, Nie Pengcheng, Liu Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216 – 226. (in Chinese)
 - 20 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, 21(11): 2933 – 2943.
Chen Qingzhang, Zhao Xiaomin, Chen Xiaoying. Design of double rounds clustering protocol for improving energy efficient in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(11): 2933 – 2943. (in Chinese)

(上接第 185 页)

- 17 Puyvelde D R Van, Young B R, Wilson M A, et al. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis[J]. Powder Technology, 1999, 106(3): 183 – 191.
- 18 韩喆, 程婧璠, 林涛. 机械设计基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
Han Zhe, Cheng Jingfan, Lin Tao. Fundamentals of mechanical design [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- 19 吕太, 张墨, 张玉峰, 等. 粉煤灰转筒干燥装置实验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2003(4): 34 – 36.
Lü Tai, Zhang Mo, Zhang Yufeng, et al. Experimental and research on the rotary dryers of fly ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2003(4): 34 – 36. (in Chinese)
- 20 孙骊, 仇农学. 农产品物理特性及测量[M]. 重庆: 重庆出版社, 2007.
- 21 Chandratilleke G R, Yu A B, Bridgwater J. A DEM study of the mixing of particles induced by a flat blade[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 79: 54 – 74.
- 22 Jiang Maoqiang, Zhao Yongzhi, Liu Gesi, et al. Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer[J]. Particology, 2011, 9(3): 270 – 278.
- 23 梅从立, 束栋鑫, 江辉, 等. 基于电子鼻和高斯过程的秸秆固态发酵过程监测技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 188 – 193.
Mei Congli, Shu Dongxin, Jiang Hui, et al. Monitoring of straw solid-state fermentation based on E-nose and Gaussian process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 188 – 193. (in Chinese)