

基于改进粒子群的农田WSN路由优化方法

缪伟晟^{1,2}, 赵春江^{2,3}, 吴华瑞^{2,3}

(1.北京工业大学 信息学部,北京 100124; 2.国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097;

3.农业农村部农业信息技术重点实验室,北京 100097)

摘要: 农田无线传感器网络(WSN)应用环境复杂,影响网络传输的因素包括环境变化、作物生长等。路由协议作为网络数据采集过程中的重要环节,其能耗优化是近年来农田WSN领域的研究热点。传统的能耗优化路由算法多数只针对静态网络环境,难以适用于动态变化的农田监测场景。为此,提出一种基于改进粒子群(PSO)的路由优化算法RD-PSO。将不同的路由传输路径抽象为粒子,根据农田网络能耗、剩余能量、网络传输跳数、链路质量等关键因子构建适应度函数,以提高路径寻优的环境适应性。同时,针对PSO路由随机初始化时迭代效率低的问题,采用反向探测方法确定网络节点的初始化拓扑位置,缩短初始位置与最优解的距离,从而提高算法的收敛速度。实验结果表明,相较ELMR、EEABR和MR-PSO路由算法,RD-PSO算法具有更快的收敛速度,在网络生命周期、能耗均衡效果以及平均传输跳数等方面性能较优,其能提高路由算法在农田动态场景中的适配性。

关键词: 农田无线传感器网络;路由算法;路径动态选择;粒子群算法;能耗优化

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式:缪伟晟,赵春江,吴华瑞.基于改进粒子群的农田WSN路由优化方法[J].计算机工程,2022,48(10):218-223.

英文引用格式:MIAO Y S,ZHAO C J,WU H R.Farmland WSN routing optimization method based on improved particle swarm optimization[J].Computer Engineering,2022,48(10):218-223.

Farmland WSN Routing Optimization Method Based on Improved Particle Swarm Optimization

MIAO Yisheng^{1,2}, ZHAO Chunjiang^{2,3}, WU Huarui^{2,3}

(1.Department of Information, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

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

3.Key Laboratory of Agri-Informatics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China)

[Abstract] The application environment of a farmland Wireless Sensor Network(WSN) is complex.The factors affecting network transmission include environmental variables,crop growth,etc.The routing protocol is an important link in the network data collection process.Therefore,research activities focused on energy consumption optimization for farmland WSN has garnered increased attention recently.Most traditional energy consumption optimization routing algorithms are designed for static network environments,which are difficult to apply to dynamic farmland monitoring scenarios.Therefore,we propose a routing optimization algorithm,namely,RD-PSO,based on improved Particle Swarm Optimization(PSO) in this study.Different routing transmission paths are abstracted as particles,and the fitness function is constructed according to the key factors,such as farmland network energy consumption,residual energy,network transmission hops,and link quality,to improve the environmental adaptability of path optimization.Furthermore,aiming to improve the low iterative efficiency of PSO routing during random initialization,a reverse detection method is used to determine the initialization topology position of the network nodes,shorten the distance between the initial position and optimal solution,and improve the convergence speed of the algorithm.The experimental results demonstrate that compared with ELMR,EEABR,and MR-PSO routing algorithms,RD-PSO attains a faster convergence speed and better performance in network life cycle,energy consumption balance effect,and average transmission hops.These developments ensure that the adaptability of our routing algorithm is superior in the dynamic environment of farmland compared with the existing methods.

[Key words] farmland Wireless Sensor Network(WSN); routing algorithm; path dynamic selection; Particle Swarm Optimization(PSO) algorithm; energy consumption optimization

DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0062655

基金项目: 国家自然科学基金“精准农业宽幅网络高通量组织与非劣分层优化关键技术研究”(61871041);北京市农林科学院青年基金项目“基于多特征融合的设施蔬菜物联网认知计算方法”(QNJJ202030);江苏大学农业装备学部项目“稻麦全域大数据识别技术及智能化装备研发”(4111680005)。

作者简介: 缪伟晟(1984—),男,博士研究生,主研方向为农业物联网、农业智能系统;赵春江(通信作者),研究员、博士、中国工程院院士;吴华瑞,研究员、博士。

收稿日期:2021-09-10

修回日期:2021-10-26

E-mail:zhaocj@nrcita.org.cn

0 概述

以无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)为代表的物联网技术,是实现农业生产中环境、土壤、动植物生理等实时监测以及温度、水肥在线调控的重要手段。通过对环境、水肥等进行精确感知与精准调控,可以减少不必要的水肥药消耗,提高农产品的产量与品质,实现绿色高效生产。WSN本身具有能量敏感、成本低等特点,而大规模农田监测网络还存在覆盖区域广、种植周期长、能量供给不便、环境复杂多变等现实情况,如何实现稳定可靠的数据传输汇集是实际应用中的难点所在^[1]。

在农田WSN监测应用中,节点异构、环境动态变化等原因进一步提高了优化网络能耗和负载均衡的难度^[2]。为提高农田环境下网络的使用寿命与长周期工作时的稳定性,本文从动态环境适配角度开展农田WSN路由优化研究,并提出一种基于改进粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)的路由优化算法RD-PSO。将农田WSN路由路径作为粒子进行寻优,以链路质量、节点剩余能量等作为粒子参数并量化,优先选择链路质量好、剩余能量高的路径进行数据传输,以延长无线监测网络在农田WSN复杂动态环境中的使用寿命。

1 农业WSN路由研究现状

WSN具有资源受限的特点,其网络能耗优化一直以来都是研究人员关注的焦点,而路由是实现低能耗传输的重要环节。孙想等^[3]针对频繁簇首选举产生过多能耗的问题,提出一种能量逼近式的簇首选择方法,该方法连续任命某一节点担任簇首直至逼近簇内平均剩余能量,有效减少了簇首选举产生的开销,延长了网络寿命。李华等^[4]提出一种基于近源数据聚合的低能耗路由协议,其根据WSN中数据分布密度的不同来选择数据融合的节点组合与转发路径,实现了网络能耗下降与拥塞控制。黄博文等^[5]提出一种K中心的近似算法来挑选簇首,使簇内节点到簇首的距离最优,进而降低与均衡能耗。上述方法在优化WSN网络能耗时均针对静态的网络条件,而农田WSN监测应用中的环境是动态变化的,从而对网络路由优化算法提出了新的挑战。

群体智能算法^[6]是求解复杂动态问题的有效手段,国内外学者在基于群体智能算法的WSN路由算法优化方面开展了诸多研究。牛祺君等^[7]设计一种基于节点剩余能量的簇首轮换机制,并通过蜂群算法优化簇首节点路由选择,减少了节点能量消耗,延长了网络寿命。谢英辉等^[8]采用遗传算法缩短了sink节点的移动距离,在简化网络拓扑结构的同时也得出了近似最优的能耗优化方案。ARJUNAN等^[9]首先采用聚类算法进行节点分簇,再通过蚁群算法优化簇首节点间路由,提高了路由算法在宽矩形区域中的适应度。FU等^[10]基于人工势场法,结合节点采集的数据判断节点所处环境的状况,进而使得优化后的路由由尽可能地避开了一些不希望到达的节点。

利用群体智能算法可以在迭代次数较少的情况下求得动态条件下近似的全局最优解,算法效率高,

适合于资源受限的农田WSN。针对农田应用场景下环境、作物生长等对无线网络传输的影响,本文提出一种基于改进PSO的路由优化算法,通过引入网络链路质量因子提高PSO算法的环境适配性,同时综合考虑节点剩余能量、路径转发跳数等因素,以期实现农田复杂动态环境下的能耗性能最优。

2 网络模型与定义

2.1 网络模型

本文讨论的大规模农田WSN场景假定有 N 个传感节点随机地被部署在一个二维矩形区域内,同时假定该WSN具有如下性质^[2,11]:

- 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对监测区域的覆盖度。
- 2) sink节点位置固定且唯一,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) 节点具有自我能量感知的能力,可获得剩余能量数据。

2.2 能耗模型

基于文献^[12]的无线通信能耗模型,可以认为节点发送 l bit数据需要消耗的能量 E_{tx} 为:

$$E_{tx} = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_f d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_m d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: E_{elec} 代表发射电路或接收电路传输1 bit数据消耗的能量; d 为发射节点与接收节点之间的距离; $d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_f}{\epsilon_m}}$ 为模型的距离阈值; ϵ_f 和 ϵ_m 为2种模式下的功率放大系数。

3 基于反向探测的改进PSO算法

农田WSN中的路由选择是典型的组合优化问题,而群体智能算法具有自关联和自组织的特点^[13],适用于解决农田WSN路由寻优问题。灰狼算法^[14]、蚁群算法^[15]等新兴智能方法具有参数少、结构简单、易于实现的特点,在WSN路由协议优化方面已被广泛应用,但对于动态环境仍存在精度低、优化维数低、收敛速度慢等不足。在求解规模较大的优化问题时,PSO算法能够在更短时间内获得优化解^[16],有利于农田感知数据的迅速传输。本文提出一种基于反向探测的改进PSO(Reverse Detection based PSO, RD-PSO)算法,通过改进算法的适应度函数与初始化方法减少网络传输能耗,进一步提高PSO算法对路由路径的搜索迭代效率。

3.1 适应度函数构建与粒子更新

农田WSN路由优化问题示意图如图1所示,从初始化路径 s_1 开始,通过算法迭代向最优路径 s_2 逼近。优化过程中首先需要考虑的是降低节点能耗以及提高节点间的能量均衡性,因此,考虑从节点剩余

能量和路径转发能耗2个方面进行加权,优化算法适应度函数,即最优路径应满足路径能耗尽可能小、路径上节点平均剩余能量以及最低剩余能量尽可能高。同时,考虑到跳数对路由算法的效率以及网络能耗性能有显著影响,因此,在求解最优路径时需要使得跳数尽可能少。此外,由于农田环境具有动态多径衰落特性,因此本文将链路质量也作为适应度函数的权重因子之一。

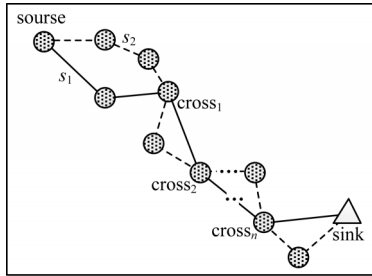


图1 基于PSO的WSN路径选择示意图

Fig.1 Schematic diagram of WSN path selection based on PSO

$$\begin{cases} v_{xid}(t) = \omega v_{xid}(t-1) + c_1 r_1 (p_{xid}(t-1) - x_{xid}(t-1)) + c_2 r_2 (p_{xgd}(t-1) - x_{xid}(t-1)) \\ v_{yid}(t) = \omega v_{yid}(t-1) + c_1 r_1 (p_{yid}(t-1) - x_{yid}(t-1)) + c_2 r_2 (p_{ygd}(t-1) - x_{yid}(t-1)) \end{cases} \quad (3)$$

其中: ω 是惯性因子; c_1 、 c_2 是学习因子; r_1 、 r_2 为0~1之间的随机数,它们可使粒子变异时具有一定的随机性,避免落入局部最优。

粒子位置的更新方法如式(4)所示:

$$\begin{cases} x_{xid}(t) = x_{xid}(t-1) + v_{xid}(t) \\ x_{yid}(t) = x_{yid}(t-1) + v_{yid}(t) \end{cases} \quad (4)$$

3.2 基于反向探测的粒子初始化

在基于PSO的WSN路由优化问题中,一个粒子初始化就是随机生成一条从源节点到sink节点的路径。传统方法以sink节点向网络发送探测包的方式,确定各个节点到sink节点的跳数值^[20]。在生成初始化拓扑时,当前节点始终选择跳数值小于自身跳数值的节点作为下一跳节点,并保留跳数小于所设定最大跳数的路径,从而保证路径方向总体趋向于sink节点。传统探测包方法适用于管道、深井等带状空间,但由于缺少在横向空间上的约束,使得其在宽矩形区域中易出现迭代效率低等问题^[21]。为此,本文提出一种针对宽矩形农田WSN的反向探测粒子初始化方法。

在本文方法中,由sink节点向其一跳范围内的传感节点广播发送探测包信息,传感节点接收到探测包后保存其距sink节点的跳数值 h_{hop_1} ,并将 h_{hop_1} 值加1后转发至其他节点,若某节点接收到多个 h_{hop_1} 值,则以收到的最小值作为其自身的 h_{hop_1} 值。由此近似地形成以sink节点为圆心、半径不同的多个圆环,各圆环区域内的 h_{hop_1} 值相同。同时,为了建立横向维度上的重复路径约束,选择一条区域边界,如图2中右侧边界所示,以最靠近边界的传感器(图2中的节点1)发送反向探测包,记节点1的 h_{hop_2} 值为1,其他转发节点的 h_{hop_2} 值增加方法与 h_{hop_1} 相同。

从图1可以看出,当前路径和最优路径存在多个交点 $cross_1, cross_2, \dots, cross_n$,这些交点可以理解路径选择中的关键点,也是WSN常见的能耗节点,对于网络能耗优化有着重要影响。对于一次数据传输路径选择过程,记源节点到sink节点的一条多跳路径为 P_i ,其对应PSO算法中的一个粒子 i ,定义适应度函数 f 如式(2)所示^[12,17]:

$$f_{fitness_i} = w_1 \frac{E_{average} E_{min}}{EC_{total}} + w_2 H_{Hop_{min}} + w_3 \sum_{P_i} \frac{1}{L_{Link}} \quad (2)$$

其中: w_1 、 w_2 、 w_3 为权重因子,且有 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$; $E_{average}$ 表示路径 P_i 的节点平均剩余能量; E_{min} 表示路径 P_i 的节点最低剩余能量; EC_{total} 表示路径 P_i 的路径总能耗; $H_{Hop_{min}}$ 为路径 P_i 的最小跳数; $\sum \frac{1}{L_{Link}}$ 为路径上各段链路质量的倒数和,其采用文献[18]中的链路质量模型进行描述。

RD-PSO算法根据初始化位置与速度计算个体最优和全局最优位置,并开始迭代寻优。粒子速度更新方法如式(3)所示^[19]:

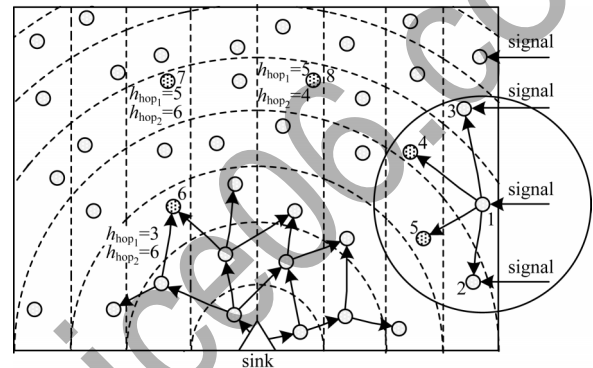


图2 基于反向探测的初始化过程

Fig.2 Initialization process based on reverse detection

当前节点在选择下一跳节点时,首先将信号范围内 h_{hop_1} 值小于自身的节点加入候选节点集合,再根据每个候选节点的 h_{hop_2} 值确定选择哪一个作为下一跳节点。记以 h_{hop_1} 值搜索到的候选节点集合为 I , I 中每个节点被选中的概率 $P_{choice}(N_i)$ 的计算方式如式(5)所示:

$$P_{choice}(N_i) = \frac{eva(i)}{\sum_{k=1}^n eva(k)} \quad (5)$$

其中: $eva(i)$ 为根据 N_i 节点 h_{hop_2} 值计算的节点得分,其值为 i 节点 h_{hop_2} 值与sink节点 h_{hop_2} 差值的倒数,如式(6)所示:

$$eva(i) = \left| h_{hop_2}(i) - h_{hop_2}(\text{sink}) \right|^{-1} \quad (6)$$

3.3 RD-PSO算法步骤

RD-PSO算法在农田WSN节点初始化完成后,按照3.2节所述内容进行反向探测,完成粒子位置和速度的初始化,并依据节点能耗、剩余能量、距离

sink的最小跳数以及链路质量等构造适应度函数,通过粒子群迭代优化确定符合农田复杂动态环境的最优路由路径。算法具体步骤如下:

- 1)根据3.2节内容进行网络节点反向探测,建立各节点到sink节点的初始化路径 P_i 以及相应粒子 i 的初始化位置与速度。
- 2)按照式(2)计算每个粒子 i 的适应度函数值。
- 3)按照式(3)、式(4)求解个体极值、全局极值以及粒子位置、速度更新值。
- 4)重复第2步和第3步,直至个体极值稳定收敛于全局极值或达到最大迭代次数。
- 5)根据得出的最优路由路径开始进行数据多跳传输,同时获取节点能量、链路质量的数据,在下一步数据传输时进行路由路径更新。

根据上述算法流程可知,本文通过反向探测对传输路径、粒子速度与位置进行初始化优化,然后利用粒子更新得到农田WSN路由。因此,本文算法复杂度为 $O(\text{iter}_1 \cdot N_1 \cdot T_1(f))$,其中: iter_1 为迭代次数; N_1 为粒子数量; $T_1(f)$ 为与适应度函数、粒子维度等因素相关的一次迭代时间。灰狼算法的复杂度为 $O(\text{iter}_2 \cdot N_2 \cdot T_2(f))$,其中: iter_2 为迭代次数; N_2 为种群数量; $T_2(f)$ 为与适应度函数、种群维度等因素相关的一次迭代时间。樽海鞘群算法的复杂度为 $O(\text{iter}_3 \cdot N_3 \cdot T_3(f))$,其中: iter_3 为迭代次数; N_3 为种群数量; $T_3(f)$ 为与适应度函数、种群维度等因素相关的一次迭代时间。本文算法与灰狼算法等群体智能算法的复杂度一致,但在求解大规模优化问题时,灰狼算法等存在精度低、优化维数低、收敛速度慢等不足,而PSO算法能够在更短时间内获得优化解^[16],有利于提高农田监测网络的整体效率。本文算法基于反向探测包理论缩短了初始位置与最优解的距离,进一步提高了PSO算法的收敛速度。

4 实验与结果分析

为对RD-PSO算法的性能进行验证,首先将其与传统PSO算法^[22]进行算法迭代收敛性能仿真对比,然后选取ELMR^[23]、EEABR^[24]和MR-PSO算法^[25]进行对比实验。实验场景具体参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置	
Table 1 Simulation parameters setting	
仿真参数	参数值
农田区域面积/m ²	200×200
传感器节点个数 N	100
节点初始能量 E_0 /J	0.5
节点最大通信半径 T_{\max} /m	100
近距离通信能耗系数 $A_{ch}/(\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1})$	0.001
远距离通信能耗系数 $A_{sn}/(\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	10
通信能耗阈值系数 d_0 /m	60
接收/发送单位bit数据的能耗 $E_{\text{elec}}/(\text{nJ} \cdot \text{b}^{-1})$	50
单次传输的数据数量/bit	100
最大迭代次数	500
权重因子 w_1, w_2, w_3	0.4, 0.3, 0.3
惯性因子 ω	0.797
学习因子 c_1, c_2	1.497

在目标区域内随机部署100个节点,完成20次独立随机部署并分别进行性能仿真实验,取平均值作为最终结果。

对比RD-PSO算法与传统PSO算法^[15]的收敛速度,20组独立实验中算法收敛迭代次数对比结果如图3所示。从图3可以看出,与传统PSO算法相比,RD-PSO算法收敛所需的迭代次数整体较低,且波动幅度比传统PSO算法小。传统PSO算法由于随机性较大,路由算法的收敛会因节点分布和状态的不同而产生较大波动。对于每组实验节点而言,本文改进算法的收敛速度均优于传统PSO算法,其原因有2个方面:一是本文算法优化了粒子初始化方法,使得初始化粒子更接近最优解;二是虚拟力影响粒子的寻优过程,使得一条路径向全局最优路径的拟合速度加快。

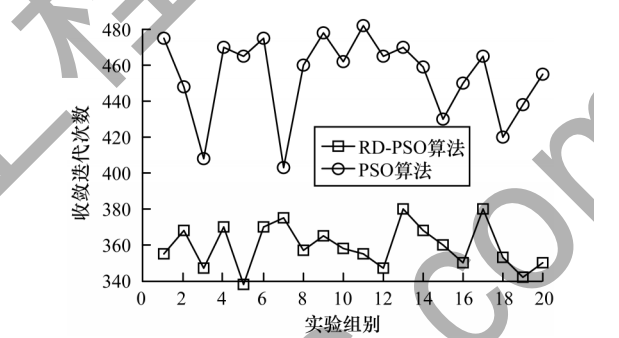


图3 RD-PSO算法与传统PSO算法的收敛速度对比
Fig.3 Comparison of convergence speed between RD-PSO algorithm and traditional PSO algorithm

不同路由算法的网络生存周期对比如图4所示,可以看出,当系统运行约300轮时,EEABR、MR-PSO算法开始出现死亡节点,当系统运行约400轮时,ELMR、RD-PSO算法开始出现死亡节点。从10%节点死亡时间来看,ELMR算法为520轮,EEABR算法为450轮,MR-PSO算法为700轮,RD-PSO算法约为820轮;从全部节点死亡时间来看,ELMR算法约为700轮,EEABR和MR-PSO算法约为800轮,RD-PSO算法约为850轮,表明RD-PSO算法的能耗性能最优,其次是MR-PSO算法,ELMR和EEABR这2种算法相对较差。

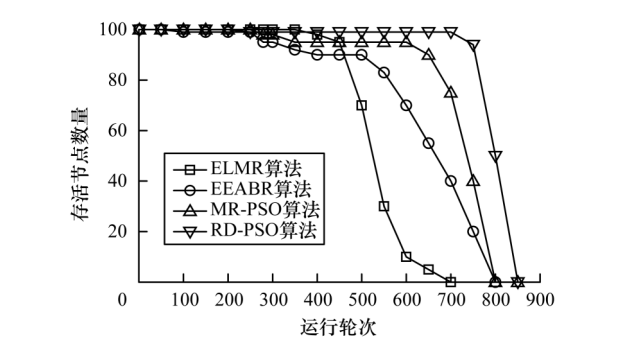


图4 不同路由算法的网络生命周期对比
Fig.4 Comparison of network life cycle of different routing algorithms

不同路由算法的网络节点剩余能量均方差对比如图5所示,从中可以看出:ELMR算法剩余能量均

方差从一开始就迅速上升,在250轮~450轮时达到较高水平,300轮峰值处约为 E_0 的4.5%,450轮后ELMR算法的剩余能量均方差开始逐步下降,对应图6中也开始出现明显的存活节点数量减少,直到700轮附近开始逐步减少至0;EEABR算法剩余能量均方差在100轮处达到最高,约为 E_0 的2%,之后略微下降,在200~500轮间维持在0.004~0.005 J之间,之后缓慢下降至0;MR-PSO算法剩余能量均方差整体上明显低于ELMR和EEABR,但高于RD-PSO,其剩余能量均方差大部分保持在0.002 J附近;RD-PSO算法的能耗均衡性最好,其剩余能量均方差始终维持在0.001 J以下。图5表明,ELMR和EEABR算法的能耗均衡效果欠佳,而RD-PSO算法从节点剩余能量角度对路由算法进行的能耗均衡改进取得了显著效果。

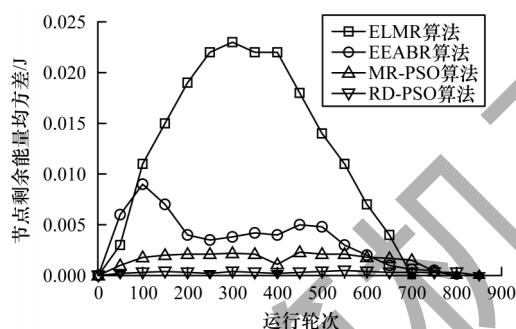


图5 不同路由算法的节点剩余能量均方差对比

Fig.5 Comparison of mean square error of node residual energy between different routing algorithms

不同路由算法的网络传输平均跳数对比如图6所示,从中可以看出:整体上ELMR算法的平均跳数最多,RD-PSO算法最低,EEABR与MR-PSO算法居中,MR-PSO算法略高于EEABR算法;从平均跳数变化上看,ELMR算法初始跳数最大,开始后逐步下降,约至300轮时降到局部低点,后逐步上升,在500轮后迅速下降至最低,EEABR算法初始跳数最大,后逐步下降至6跳并稳定,在700轮后迅速下降至最低,MR-PSO算法在前300轮时平均跳数稳定在6跳,后整体提高到7跳、8跳,在750轮后迅速降至最低,RD-PSO算法在前450轮稳定在4跳、5跳,550轮后整体上升至5跳、6跳并保持稳定,在850轮后迅速降至最低。

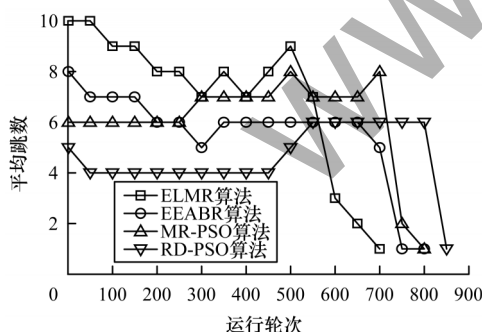


图6 不同路由算法的平均跳数对比

Fig.6 Comparison of average hops of different routing algorithms

从适应度函数对跳数的约束定义中不难得出,跳数较小的算法具有更佳的能耗性能,因此,图6结果也验证了图4、图5中算法的能耗分析结果。

5 结束语

路由协议作为网络数据采集过程中的重要环节,对网络性能的影响重大,路由能耗优化是近年来农田WSN领域的研究热点。本文针对农田复杂动态环境下WSN监测应用中的能耗优化问题,在PSO算法的基础上提出一种改进的路由优化算法RD-PSO,其根据农田WSN应用中的剩余能量、传输跳数、链路质量等因素构建适应度函数,并采用反向探测的方式提高粒子初始化的效率。实验结果表明,相对ELMR、EEABR和MR-PSO路由算法,RD-PSO算法可以提高节点间的能耗均衡效果,延长网络生命周期,在农田复杂动态环境下实现高效可靠的WSN数据汇集。开放农田中气象环境复杂,作物分布密集,这造成了农田WSN中传输链路质量不稳定、数据传输可靠性不高等问题。因此,后续将引入机会路由理论,结合群体智能算法设计高效的农田数据机会传输机制,进一步提高网络能效并延长网络寿命。

参考文献

- [1] BEN-OTHTMAN J, YAHYA B. Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(8): 849-857.
- [2] MIAO Y S, ZHAO C J, WU H R, et al. Non-uniform clustering routing protocol of wheat farmland based on effective energy consumption[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 142-150.
- [3] 孙想, 吴保国, 吴华瑞, 等. 能量高效的农田无线传感器网络拓扑关联路由算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 232-238.
SUN X, WU B G, WU H R, et al. Topology based energy efficient routing algorithm in farmland wireless sensor network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 232-238. (in Chinese)
- [4] 李华, 刘占伟, 郭育艳. WSN中结合近源数据聚合和拥塞控制的低能耗路由协议[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(11): 111-120.
LI H, LIU Z W, GUO Y Y. Low energy routing protocol combined with near source data aggregation and congestion control in WSN[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2019, 33(11): 111-120. (in Chinese)
- [5] 黄博文, 王斌, 丁杰, 等. 基于K中心的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机科学与应用, 2019, 9(3): 495-500.
HUANG B W, WANG B, DING J, et al. A routing protocol of wireless sensor networks based on K-center[J]. Computer Science and Application, 2019, 9(3): 495-500. (in Chinese)

- [6] 赵健,张鑫祺,李佳明,等. 群体智能2.0研究综述[J]. 计算机工程,2019,45(12):1-7.
ZHAO J, ZHANG X T, LI J M, et al. Research review of crowd intelligence 2.0[J]. Computer Engineering, 2019, 45(12):1-7. (in Chinese)
- [7] 牛祺君,张永辉. 基于蜂群算法的无线传感器网络层次路由优化[J]. 计算机仿真,2018,35(12):229-232,420.
NIU Q J, ZHANG Y H. Optimization of WSN hierarchical routing based on artificial bee colony algorithm [J]. Computer Simulation, 2018, 35(12):229-232, 420. (in Chinese)
- [8] 谢英辉,胡君,唐一韬. 基于遗传算法的移动 Sink 数据采集信宿路算法[J]. 传感技术学报,2019,32(7):1095-1099.
XIE Y H, HU J, TANG Y T. Genetic algorithm-based mobile Sink data collecting algorithm for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(7):1095-1099. (in Chinese)
- [9] ARJUNAN S, SUJATHA P. Lifetime maximization of wireless sensor network using fuzzy based unequal clustering and ACO based routing hybrid protocol [J]. Applied Intelligence, 2018, 48(8):2229-2246.
- [10] FU X W, FORTINO G, PACE P, et al. Environment-fusion multipath routing protocol for wireless sensor networks[J]. Information Fusion, 2020, 53:4-19.
- [11] ANISI M H, ABDUL-SALAAM G, ABDULLAH A H. A survey of wireless sensor network approaches and their energy consumption for monitoring farm fields in precision agriculture[J]. Precision Agriculture, 2015, 16(2):216-238.
- [12] 喻小惠,张晶,陶涛,等. 基于蚁群策略的无线传感器网络能耗均衡分簇算法[J]. 计算机工程与科学,2019,41(7):1197-1202.
YU X H, ZHANG J, TAO T, et al. An energy consumption balanced clustering algorithm for wireless sensor networks based on ant colony strategy[J]. Computer Engineering & Science, 2019, 41(7):1197-1202. (in Chinese)
- [13] SUN W F, TANG M, ZHANG L J, et al. A survey of using swarm intelligence algorithms in IoT[J]. Sensors, 2020, 20(5):1420.
- [14] ZHAO X Q, REN S Y, QUAN H, et al. Routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks based on a modified grey wolf optimizer[J]. Sensors, 2020, 20(3):820.
- [15] 蒋占军,周涛,杨永红. WSN中基于改进蚁群的能量优化路由算法[J]. 计算机工程,2020,46(4):189-197.
JIANG Z J, ZHOU T, YANG Y H. Energy optimized routing algorithm based on improved ant colony in WSN[J]. Computer Engineering, 2020, 46(4):189-197. (in Chinese)
- [16] 杨烈兵. 粒子群算法和灰狼算法的货位优化对比研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.
YANG L B. Comparative research on location optimization of particle swarm optimization and grey wolf algorithm[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 刘英. 遗传算法中适应度函数的研究[J]. 兰州工业高等专科学校学报,2006,13(3):1-4.
LIU Y. Research on fitness function in genetic algorithm [J]. Journal of Lanzhou Polytechnic College, 2006, 13(3):1-4. (in Chinese)
- [18] 缪伟晟,吴华瑞,李飞飞,等. 基于统计分布的小麦农田多径衰落信道建模研究[J]. 电子学报,2016,44(3):665-672.
MIAO Y S, WU H R, LI F F, et al. Study of wheat farmland multipath fading channel modeling based on statistical distribution[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3):665-672. (in Chinese)
- [19] RUAN D W, HUANG J H. A PSO-based uneven dynamic clustering multi-hop routing protocol for wireless sensor networks[J]. Sensors, 2019, 19(8):1835.
- [20] 武小年,张楚芸,张润莲,等. WSN中基于改进粒子群优化算法的分簇路由协议[J]. 通信学报,2019,40(12):114-123.
WU X N, ZHANG C Y, ZHANG R L, et al. Clustering routing protocol based on improved PSO algorithm in WSN[J]. Journal on Communications, 2019, 40(12):114-123. (in Chinese)
- [21] 朱永红,丁恩杰,胡延军. PSO优化的能耗均衡WSNs路由算法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(1):78-86.
ZHU Y H, DING E J, HU Y J. Energy balance routing algorithm for WSNs optimized with PSO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1):78-86. (in Chinese)
- [22] 袁浩. 基于粒子群算法的WSN路径优化[J]. 计算机工程,2010,36(4):91-92,96.
YUAN H. Wireless sensor network path optimization based on particle swarm algorithm[J]. Computer Engineering, 2010, 36(4):91-92, 96. (in Chinese)
- [23] 樊志平,谢冬青,金政哲. 无线传感网络能量有效负载均衡的多路径路由策略[J]. 小型微型计算机系统,2013,34(2):253-257.
FAN Z P, XIE D Q, JIN Z Z. Energy-efficient and load-balancing multipath routing scheme for wireless sensor networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(2):253-257. (in Chinese)
- [24] 侯梦婷,赵作鹏,高萌,等. 采用角度因子的蚁群优化多路径路由算法[J]. 计算机工程与应用,2017,53(1):107-112.
HOU M T, ZHAO Z P, GAO M, et al. Ant colony optimization multipath routing algorithm adopted angle factor [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(1):107-112. (in Chinese)
- [25] LI H L, DU Y W, XU N. Multi-path routing algorithm in WSN using an improved particle swarm optimization[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019, 10(4):361-368.