

WSN 低能耗数据收集遗传粒子群算法研究

王鸿磊^{1,2} 徐平平¹ 朱文祥¹ 尤星秒¹

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)¹

(徐州工业职业技术学院信息与电气工程学院 徐州 221140)²

摘要 针对设施农业无线传感器网络节点分布不均匀、能量约束严格的特点,为降低网络总能耗,提出一种改进的遗传粒子群算法,构建一棵树高受限且网络总能耗最小的数据收集树。首先,随机生成连通图网络,采用父节点表示法将生成树编码成粒子;然后,设计一种随机生成数据收集树算法,随机产生满足树高限制的生成树;最后,考虑节点能耗均衡,设计一种粒子单点突变算法,实现对节点能耗最优值的比较。通过粒子单点变异、交叉以及优化新粒子,提高了种群多样性,避免了算法过早陷入局部最优解,在满足时延要求的同时,降低了网络总能耗。实验表明,与有树高约束的 DL-DCT 算法相比,所提算法降低了 7.34% 的网络总能耗,延长了网络平均生存期。

关键词 无线传感器网络,数据收集,遗传算法,粒子群算法,低能耗

中图分类号 TP915 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.019

Research on Low Energy-consumption Data Collection for WSN Environment Based on Genetic Particle Swarm Optimization

WANG Hong-lei^{1,2} XU Ping-ping¹ ZHU Wen-xiang¹ YOU Xing-miao¹

(National Mobile Communications Research Lab., Southeast University, Nanjing 210096, China)¹

(School of Information and Electrical Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China)²

Abstract Aiming at the problems in green house wireless sensor networks such as uneven nodes distribution, strict energy constraint, etc, an improved genetic particle swarm optimization algorithm was proposed to solve the problem of total energy consumption in data collection of wireless sensor networks. This algorithm uses the parent node representation method to encode the spanning tree into particles. An algorithm for generating random data collection tree was designed, which can satisfy the spanning tree of tree height. A single point mutation algorithm was designed, which makes the spanning tree satisfy the height limit of the tree. The particles get the next iteration by the single point mutation, the extreme value of the individual and the global extreme value time. Under the same number of hops, the simulation results show that the algorithm proposed in this paper reduces 7.34% of the total energy consumption compared with the DL-DCT and it prolongs the average lifetime of network.

Keywords Wireless sensor network, Data gathering, Genetic algorithm, Particle swarm optimization, Low energy consumption

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)在很多领域有广泛应用,如环境监控、桥梁结构检测、突发事件检测、车辆跟踪等^[1]。随着现代化农业的普及,设施大棚的控制与管理早已摆脱了农民手工作业,取而代之的是由无线传感器网络组成的设施农业物联网管控系统^[2]。IEEE 802.15.4 标准^[3]定义了低功耗、低速率的无线网络的介质访问层(Medium Access Control, MAC)和物理层(Physical, PHY)。当代 WSN 在 MAC 层和 PHY 层采用上述标准,因此无线链路的无线电覆盖范围小,数据包需要经过多跳传输才能完成从一

个传感器节点到达 sink 节点^[4]。传感器节点大多由能量有限的电池供电,且长期在无人值守的状态下工作。由于设施农业环境传感器网络中节点个数多、分布区域广、所处环境复杂,通过更换电池的方式来补充能源是不现实的,因此能量有效性成为 WSN 一个重要的设计指标^[5],必须对 WSN 进行能量管理^[6]。采用有效的节能策略降低节点的能耗,增加无线网络及节点电池的供电时间,从而延长 WSN 在不更换电池条件下的生存期^[7-8]。另一方面,高效农业设施大棚一般种植比较名贵或经济附加值高的作物,如遇到寒流导致迅速降温或极恶劣天气袭来,需要尽快将感知信息快速传递到 sink 节点以进行分析并采取应急控制措施,否则会引起设施大棚中

到稿日期:2015-11-03 返修日期:2016-04-01 本文受国家自然科学基金(6504030000),移动通信国家重点实验室基金(2015A03),徐州市科技发展基金(XF13C035),院级科研课题基金(XGY201414)资助。

王鸿磊(1979-),男,硕士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络理论与技术,E-mail:98312226@163.com;徐平平(1957-),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络理论与技术;朱文祥(1985-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络理论与技术。

作物大面积受灾,导致作物冻坏甚至冻死,而造成巨大的经济损失。因此,设施农业大棚中的无线传感器网络不仅要充分利用节点的能量以延长网络生存周期,而且要使网络时延尽可能短,即要求最大化生命周期并最小化数据收集时延。

对于多跳无线传感器网络数据收集树而言,数据收集时延受到数据传播时延、数据处理时延、树的高度等多个因素的影响,其中树的高度对数据收集时延的影响最大^[9]。因此,设施农业大棚中的无线传感器网络需要在树高受限的前提下设计一种降低网络总能耗的数据收集生成树算法来适应低能耗、低时延应用场景。

很多文献提出了大量基于树的数据收集协议。PEDAP-PA^[10]和MNL^[11]在构建生成树时,将树外节点作为叶子节点被加入到树中,在树没建立前无法确定一个节点最终拥有几个叶子,因此生成树往往存在负载不均衡、树高无法控制的问题。DB-MDST^[12]通过限定树的高度来限定延迟,它利用与IAA^[13]类似的“加入-删除”边的方法优化树的生命周期,但该算法没考虑节点能量。Xu H^[14]研究了树高受限的网络生存期最大化问题,将该问题形式化为一个整数规划问题,证明了该问题是个NP难问题,提出了有效的解决算法LPTC。张帅^[15]在LPTC的基础上进行了改进;在链路权值和拓扑重构过程中均考虑了节点剩余能量,提出了一种启发式的节点能耗均衡的数据收集树构建算法DL-DCT,通过两跳转变为一跳来降低能耗,但同时也使某些节点加速死亡。最大化生命周期和最小化数据收集时延是最优化问题,很多文献通过智能优化算法来解决。郭文忠^[16]提出一种有效离散PSO算法求解多约束最小生成树问题,该算法将遗传算法中的变异算法和交叉算子融入到离散PSO算法中,并从理论上分析了该算法的收敛性,但是假设网络是理想状态的完全图,粒子编码采用prufer数编码机制,缺乏实际应用价值。Shen^[17]在链路存在一定丢包率的情况下研究了时延受限的生命周期最大化生成树问题,提出一种改进遗传算法,但缺乏节点能耗最优的比较研究。

以上算法没有考虑分簇算法下节点能耗均衡问题,也没有考虑以连通图为主的实际情况,缺乏节点能耗最优值的比较研究。实际上,设施农业无线传感器网络都是连通图,通过改进遗传粒子群算法优化数据收集树可有效降低网络总能耗,从而进一步延长网络生命周期。

针对设施农业无线传感器网络节点分布不均匀、能量约束严格等特点,在限制树高的前提下,研究了最小化网络总能耗的数据收集问题,并将该问题形式化为一个单约束单目标优化问题,然后提出改进的遗传粒子群算法来进行求解,通过引入遗传算法的变异和交叉算子,提高种群多样性并避免算法过早陷入局部最优解。该算法采用父节点表示法将生成树编码成粒子;设计一种随机生成数据收集树的算法实现粒子的初始化,产生满足树高限制的生成树;设计一种粒子单点突变算法,使得突变后的生成树在满足树高限制的前提下,在每次迭代过程中,每个粒子通过单点变异、与个体极值交叉、与全局极值交叉,优化下一次迭代新粒子,在保证网络传输时延受限的前提下达到均衡网络负载、减小网络总能耗、增大网络生命周期的目的。

2 系统模型和问题描述

2.1 系统模型

假设在 $M \times M \text{ m}^2$ 的感知区域内随机分布 $n+1$ 个传感节点。整个网络形成一个连通无向图,记作 $G=(V, E)$,其中, V_0 是sink, $V=\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 为网络节点集合, E 为 G 中边的集合,如果两个节点 V_i 和 V_j 均在对方的最大通信半径内,则边 $(V_i, V_j) \in E$ 。此无线传感器网络具有以下性质:

(1)网络是连通的、静态的,所有节点一旦部署不得移动。

(2)sink节点外接电源,其余传感器节点采用能量有限的电池供电,且不能补充。

(3)所有节点能对数据完全聚合(Fully Aggregate)^[18]。在一轮数据收集集中,首先,每个树上的节点会接收其孩子节点发来的多个大小为 k bits的数据包;其次,与自己产生的 k bits的数据进行聚合;最后,发送一个大小为 k bits的数据包给自己的父节点。

定义1 时延为在数据收集树中节点到sink的跳数。

定义2 发射节点发射 k bits数据的功耗为 $E_{tx}(k, d)$,接收节点接收 k bits数据的功耗为 $E_{rx}(k)$,分别定义为:

$$E_{tx}(k, d) = \begin{cases} E_{tx-p} * k + e_{fp} * k * d^2, & d < d_{over} \\ E_{tx-p} * k + e_{mp} * k * d^2, & d \geq d_{over} \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{rx}(k) = E_{rx-p} * k \quad (2)$$

其中, E_{tx-p} , E_{rx-p} 为发射机和接收机电路相应的每bit的功耗; d 为两节点间的距离; d_{over} 为距离阈值; e_{fp} , e_{mp} 为两种功率的放大能量系数,当 $d < d_{over}$,采用自由空间衰减模型系数 e_{fp} ,当 $d \geq d_{over}$,采用自由空间衰减模型系数 e_{mp} 。 $d < d_{over}$ 传输衰减损耗与距离呈平方关系, $d \geq d_{over}$ 传输衰减损耗与距离呈4次方关系。

定义3 节点 i 有 j 个孩子节点,能耗 E_i 定义为:

$$E_i = E_{tx}(k, d) + j * E_{rx}(k) \quad (3)$$

定义4 数据收集树 T 的网络总能耗 $E_{tree}(T)$ 定义为:

$$E_{tree}(T) = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

2.2 问题描述

树的生命周期最大和最小延迟两个问题是互相矛盾的,很难同时实现^[19]。为了解决限定延迟或树高受限的网络总能耗最小的问题,数据收集树 T 的构造问题可通过以下方式定义:原始网络图 G 构造一棵数据收集树 T , $T_s(G)$ 为 G 中所有生成树集合,使得任意节点 i 到sink的跳数 h_i 不能超过限定值 H ,并且网络总能耗最小,如式(5)所示:

$$\min_{T \in T_s(G)} E_{tree}(T) \quad \max_{i=1, \dots, n} \{h_i\} \leq H \quad (5)$$

3 改进的遗传粒子群算法

结合郭文忠^[16]提出的在离散粒子群算法中的引入遗传算法中的变异算子和交叉算子,提出一个改进型遗传粒子群算法来构建一棵树高受限且网络总能耗最小的数据收集树,提高了种群多样性并避免了算法过早陷入局部最优解。该算法包括一种随机生成的满足树高限制的数据收集树算法和一种粒子单点突变算法,使突变后的生成树满足树高限制并降低了总能耗。改进的遗传粒子群算法的流程如图1所示,其中 m 为粒子群体大小, t_{max} 为最大迭代次数, t 为迭代次数。

下文将详细介绍各步骤的具体内容。

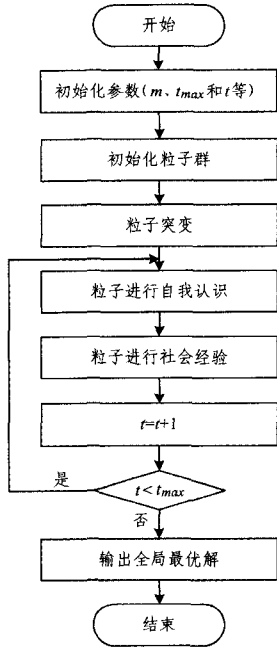


图 1 改进的遗传粒子群算法流程图

3.1 粒子的编码机制

用一个长度为 n 的序列 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 来表示一棵有 n 个节点的生成树, P_i 为第 i 个节点的父节点。

3.2 粒子群初始化

提出一种在图型拓扑结构中随机生成符合树高限制为 H 的生成树算法。对于网络中的节点 i , 寻找一条到 sink 的跳数满足限制的路径。具体实现过程如图 2 所示。

Step 1 求出拓扑图中每个节点到 sink 的最小跳数 $level$, 节点按 $level$ 值降序排列, 序列为 Q 。如果 $level$ 的最大值大于树高约束 H , 判断此拓扑图不存在满足树高限制的生成树, 算法结束; 否则, 初始化 $i=1$ 。

Step 2 针对 Q 中的第 i 个节点 $node_i$, 判断 $node_i$ 是否已有父节点, 如果已有, 则进入 Step 6; 否则, 初始化高度 hop_i 为 1; 初始化空集合 $Path$, 保存 $node_i$ 到 sink 的路径中所经过的节点, 将 $node_i$ 加入到 $Path$ 中, 初始化大小为 $n \times n$ 的空集合 $flag$ 。

Step 3 如果 $node_i$ 是 sink 节点或 $node_i$ 已有父节点, 则进入 Step 5; 否则把 $node_i$ 的邻居节点 $node_j$ 加入到节点集合 $parent_set$, $node_j$ 的选取必须满足以下 3 个条件: 1) j 不在 $Path$ 中; 2) j 的跳数小于等于 H ; 3) $flag(node_i, j) = 0$ 。

Step 4 判断 $parent_set$ 是否为空。如果 $parent_set$ 不为空, 从 $parent_set$ 中随机选择一个节点 j 作为 $node_i$ 的父节点; $hop = hop + 1$; $node_i = node_j$; $node_j$ 加入到 $Path$ 中, 进入 Step 3; 否则 $flag(node_i, :) = 0$; $temp$ 为 $Path$ 中 $node_i$ 的子节点, $flag(temp, node_i) = 1$, $hop = hop - 1$; 将 $node_i$ 从 $Path$ 中删除, $node_i = temp$, 进入 Step 3。

Step 5 对于 $Path$ 中的所有节点, 均已找到一条到 sink 的路径, 每个节点的父节点为它在 $Path$ 中的右相邻节点, 更新 $Path$ 中的所有节点的 $level$ 值。

Step 6 $i = i + 1$ 。如果 i 等于 $n + 1$, 表明所有节点都已经分配到父节点, 算法结束; 否则, 进入 Step 2。

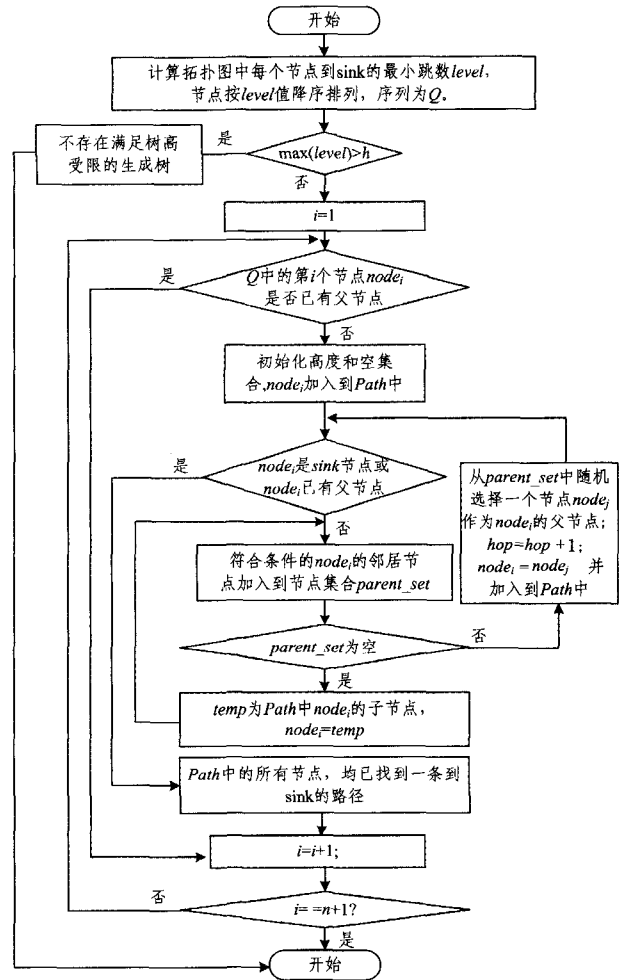


图 2 随机生成符合树高约束为 H 的生成树的算法

3.3 粒子突变

提出一种粒子单点突变算法。随机选择一个粒子节点, 通过该算法改变其父节点来实现粒子变异, 突变后的生成树满足树高限制。

设 T 是图 $G = (V, E)$ 的一棵生成树, 其对应的编码序列为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 解码 P 得到相应的生成树 T , 该算法对生成树 T 进行突变的具体步骤如下。

Step 1 随机选择一个节点 $node_i$, 去除其与父节点 $node_p$ 的连线, 则原先的生成树 T 变成两棵树, 一棵树 T_1 以 $node_i$ 为根节点, 另一棵 T_2 以 sink 为根节点。

Step 2 假设 T_1 的高度为 $hop < H$ 。遍历 T_2 , 如果 $node_j$ 为 $node_i$ 的邻居节点, 且 $node_j$ 的 $level < H - hop$, 则将 $node_j$ 加入到集合 $parent_set$ 中, 遍历完之后, 从 $parent_set$ 中随机选择一个节点作为 $node_i$ 的父节点。

3.4 粒子的自我认知和社会经验

假设第 i 个粒子第 t 次迭代后的值为 $A(i, t)$, 根据网络总能耗比较, 假设该粒子经过 t 次迭代后的个体最优值为 $pbest(i)$, 整个粒子群经过 t 次迭代后的全局最优值为 $gbest$ 。

粒子的自我认知过程: 将 $A(i, t)$ 和 $pbest(i)$ 解码成相应的生成树, 再将这两棵生成树合并成一个图 G , 利用生成树算法从 G 中随机产生一棵满足树高限制的生成树 T , 再将其编码成相应的粒子。

粒子的社会经验过程: 将 $A(i, t)$ 和 $gbest$ 解码成相应的

生成树,再将这两棵生成树合并成一个图 G ,利用生成树算法从 G 中随机产生一棵满足树高限制的生成树 T ,再将其编码成相应的粒子。

3.5 粒子的更新公式

在离散粒子群算法中引入遗传算法的变异算子和交叉算子,保持了种群多样性,同时避免了陷入局部最优解,假设在第 $t-1$ 次迭代过程中,第 i 个粒子为 $X(i,t-1)$, r_1, r_2 和 r_3 是在 $[0,1]$ 范围内的随机数。首先,粒子 $X(i,t)$ 经过粒子单点突变算法进行单点突变后得到 $A(i,t)$,即:

$$A(i,t) = F_1(X(i,t-1), w) = \begin{cases} M(X(i,t-1)), & r_1 < w \\ X(i,t-1), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中, M 同遗传算法中的变异算子。其次,粒子 $A(i,t)$ 进行自我认知,得到 $B(i,t)$,即:

$$B(i,t) = F_2(A(i,t), c_1) = \begin{cases} C_{pbest}(A(i,t)), & r_2 < c_1 \\ A(i,t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $C_{pbest}(A(i,t))$ 算子表示将 $A(i,t)$ 与第 i 个粒子的个体最优解 $pbest(i)$ 进行交叉运算。最后,粒子 $B(i,t)$ 经过社会经验后得到下一次迭代过程的粒子 $X(i,t)$:

$$X(i,t) = F_3(B(i,t), c_2) = \begin{cases} C_{gbest}(B(i,t)), & r_3 < c_2 \\ A(i,t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $C_{gbest}(B(i,t))$ 算子表示将 $B(i,t)$ 与在整个粒子群中到目前为止搜索到的最优解 $gbest(i)$ 进行交叉运算。

将式(6)~式(8)进行合并,可得到粒子的位置更新公式为:

$$X(i,t) = F_3(F_2(F_1(X(i,t-1), w), c_1), c_2) \quad (9)$$

4 仿真实验与性能分析

4.1 实验方法及参数

通过 Matlab 仿真对 DL-DCT 算法^[15]、最小生成树 MST 算法和本文提出的改进遗传粒子群算法进行比较。本节从树高约束、节点数目两个方面将上述 3 种算法进行了网络总能耗和生成树树高性能的比较,主要参数如表 1 所列。

表 1 网络仿真参数

参数	数值
监测面积/m×m	100×100
节点数量 N /个	60
发送电路能耗 $E_{tx-p}/(nJ \cdot b^{-1})$	50
接收电路能耗 $E_{rx-p}/(nJ \cdot b^{-1})$	50
功率放大器能量系数 $e_{amp}/(nJ \cdot b^{-1})$	100
每周期节点产生的数据包的长度/bits	128
距离阈值 d_{over}/m	40
粒子个数/个	100
迭代次数/次	1000
平均次数/次	100

4.2 实验结果与分析

4.2.1 树高约束对网络总能耗的影响

图 3、图 4 是 3 种算法在不同跳数限制下的网络总能耗、生成树的树高仿真图。MST 算法与树高限制无关,其生成的生成树总能耗最小,树高最大。随着树高限制的增加,其 MST 算法对应的网络总能耗和树高均不变。随着跳数限制

的增加,DL-DCT 算法和本文所提算法的网络总能耗减小,且两者对应的生成树的树高均没有超过跳数限制。两者的网络总能耗均大于 MST 算法,树高均小于 MST 算法。在相同跳数限制条件下,采用 DL-DCT 算法的网络总能耗分别为 0.822458295J, 0.785343149J, 0.757738469J, 0.741984071J, 0.733508569J, 0.727286308J, 0.723128052J, 0.719742817J, 本文提出的算法的网络总能耗分别为 0.762119026J, 0.745527912J, 0.732821496J, 0.725042827J, 0.718972471J, 0.717077718J, 0.715918985J, 0.715376358J。当跳数限制为 4 时,本文算法比 DL-DCT 算法降低了 7.34% 的总能量消耗。DL-DCT 算法和本文提出的算法随着跳数限制的增加,生成的数据收集树的树高均没有超过跳数限制。因此,在不同的跳数约束下,本文提出的算法生成的数据收集树的总能耗具有明显优势,可以延长网络平均生存期。

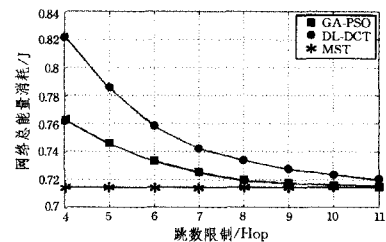


图 3 不同跳数限制下的网络总能耗

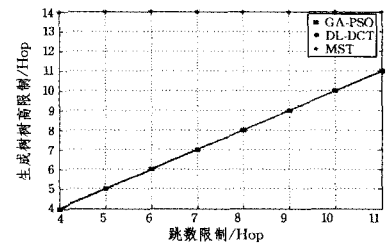


图 4 不同跳数限制下的树高

4.2.2 节点个数对网络总能耗的影响

图 5 给出了节点数目分别为 60, 70, 80, 90 时 3 种算法的网络总能耗,其中 DL-DCT 算法和本文提出的算法对应的跳数限制为 MST 算法对应生成树树高的一半。3 种算法的网络总能耗随着网络节点个数的增加而增加。由于 MST 算法生成最低生成树,因此其网络总能耗在 3 种算法中最低。网络节点分别为 60 个、70 个、80 个、90 个时,采用 DL-DCT 算法的总能耗分别是:0.871439646J, 0.99103056J, 1.113275351J, 1.246962046J, 采用本文提出的算法的总能耗分别为 0.858284413J, 0.982901527J, 1.10548638J, 1.238121132J。当总节点数为 60 时,本文提出的算法比 DL-DCT 算法降低了 1.51% 的网络总能耗,延长了网络平均生存期。

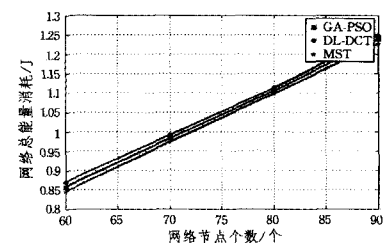


图 5 不同节点数目下的网络总能耗

结束语 本文在设施农业无线传感器网络节点分布不均匀、能量约束严格的前提下,根据随机生成的连通图网络,考虑节点能耗均衡,基于节点能耗最优值比较,提出一种改进的遗传粒子群算法来构建一棵树高受限且网络总能耗最小的数据收集树,解决了最小化网络总能耗的收集问题。该算法包括一种随机生成满足树高限制的数据收集树算法和一种粒子单点突变算法,通过引入遗传算法的变异和交叉算子,提高了种群多样性并避免了算法过早陷入局部最优解。实验表明,与有树高约束的DL-DCT算法相比,本文提出的算法能在保证树高限制的前提下减小网络总能耗,提高网络生存期。下一步的研究将从异构网的角度考察设施农业时延受限条件下的低能耗数据收集树的构建问题。

参考文献

- [1] ZHANG X W, DAI H P, XU L J, et al. Mobile Assisted data gathering strategies in WSNs[J]. *Journal of Software*, 2013, 24(2):198-214. (in Chinese)
张希伟,戴海鹏,徐力杰,等.无线传感器网络中移动协助的数据收集策略[J].*软件学报*,2013,24(2):198-214.
- [2] FU B J, WANG J H, HE Y, et al. Green house management model of Internet of things based on mobile Agent[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(S2):264-266. (in Chinese)
付宝君,王建华,贺裕,等.基于移动Agent技术的物联网温室大棚管理模型[J].*计算机应用*,2012,32(S2):264-266.
- [3] IEEE Computer Society. IEEE 802. 15. 4 Standard for Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY)[J]. Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2011.
- [4] ZHU Y H, XU J, TIAN X Z, et al. Energy-efficient and low-delay Reliable Data Gathering Scheme Applying Simple Reed-Solomon Code for Wireless Sensor Network[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2015, 38(10):2106-2124. (in Chinese)
朱艺华,徐骥,田贤忠,等.无线传感器网络应用简单Reed-Solomon编码的低能耗和低时延可靠数据收集方案[J].*计算机学报*,2015,38(10):2106-2124.
- [5] LU X L, WANG Y Y. Data collection algorithm for mobile sink in delay-constrained network[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(10):107-116. (in Chinese)
卢先领,王莹莹.时延受限的移动sink数据收集算法[J].*通信学报*,2014,35(10):107-116.
- [6] GAO X, YUAN M B, RAO D, et al. Research on the Application of the Low-power Sleeping Algorithm for Agricultural Wireless Sensor Network[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2015(1):101-105. (in Chinese)
高霞,袁明波,饶顿,等.农用无线传感器网络低功耗休眠算法应用研究[J].*山东农业大学学报(自然科学版)*,2015(1):101-105.
- [7] PENG A P, GUO X S, CAI W, et al. Research on energy management of wireless sensor networks[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2007, 26(8):1-5. (in Chinese)
彭爱平,郭晓松,蔡伟,等.无线传感器网络能量管理研究[J].*传感器与微系统*,2007,26(8):1-5.
- [8] PENG C, GUO J, PEI L X, et al. Energy-efficiency Strategies in Wireless Sensor Networks[J]. *Control Engineering of China*, 2010(3):372-375. (in Chinese)
彭晨,郭静,裴灵犀,等.无线传感器网络中的节能策略[J].*控制工程*,2010,17(3):372-375.
- [9] LIANG J B, WANG J X, CHEN J E. A delay-constrained and maximum lifetime data gathering algorithm for wireless sensor networks[C]//*Proc. of 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN2009)*. 2009:148-155.
- [10] TAN H O, KORPEOGLU I. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks[C]//*ACM SIGMOD Record*. New York:ACM NY,2003:66-71.
- [11] LIANG W F, LIU Y Z. Online data gathering for maximizing network lifetime in sensor networks[J]. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 2007, 6(1):2-11.
- [12] KWON S, KIM J, KIM C. An efficient tree structure for delay sensitive data gathering in wireless sensor networks[C]//*The IFFI 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008:738-743.
- [13] WU Y, SONIA F, NESS S. On the construction of a maximum lifetime data gathering tree in sensor networks: NP-completeness and approximation algorithm[C]//*Proc The IEEE 27th Conference on Computer Communications (INFOCOM2008)*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008:356-360.
- [14] XU H, HUANG L, LIU W. Topology control for delay constraint data collection in wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2009, 32(17):1820-1828.
- [15] ZHANG S, LI F R, LIN Z H, et al. Delay constraint energy balance data collection tree in wireless sensor network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(9):12-15. (in Chinese)
张帅,李凤荣,林振华,等.时延受限能耗均衡的无线传感网数据采集树[J].*计算机工程与应用*,2011,47(9):12-15.
- [16] GUO W Z, CHEN G L. An Efficient Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm for Multi-Criteria Minimum Spanning Tree[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2009, 22(4):597-604. (in Chinese)
郭文忠,陈国龙.一种求解多目标最小生成树问题的有效离散粒子群优化算法[J].*模式识别与人工智能*,2009,22(4):597-604.
- [17] SHEN Y Y, LI Y J, ZHU Y H. Maximizing the Lifetime of Unreliable Sensor Networks with Delay Constraint via Genetic Algorithm[C]//*Advances in Wireless Sensor Networks Communications in Computer and Information Science*. 2013:381-392.
- [18] THOMAS C, CHOMAS L, RONALD R, et al. Introduction to Algorithms[M]. Cambridge:MIT Press,2001:25-28.
- [19] LING J B, WANG J X, CHEN J E. On the Construction of a Delay-Constrained Maximum Lifetime Tree in Wireless Sensor Networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(2):345-351. (in Chinese)
梁俊斌,王建新,陈建二.在传感器网络中构造延迟限定的最大化生命周期树[J].*电子学报*,2010,38(2):345-351.