

摘要：设计了一种基于二进制入侵杂草算法的无线传感网络覆盖优化方法。首先在原始的二进制入侵杂草算法的基础上，优化了杂草的编码与种子的产生方法。杂草由一串二进制编码组成。通过特定的函数计算出父代杂草中每一位的变异概率，并根据变异的概率去产生种子。其次，为了克服入侵杂草算法的缺点，杂草种群的生成采用自适应的标准差。将不同优化策略进行对比，结果表明，二进制入侵杂草算法具有更好的收敛性能并可以显著提高目标覆盖率、延长网络寿命。

关键词：入侵杂草算法；二进制编码；自适应的标准差；无线传感网络

中图分类号：TP212.9

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)09-0021-06

收稿日期：2018-08-27

基于二进制入侵杂草算法的无线传感网络覆盖研究

张桂琴

解放军 61112 部队，黑龙江牡丹江 157011

一、引言

在许多目标覆盖的应用中，比如导航、目标定位等，每个被监测目标通常需要被多个无线传感器节点所覆盖。由于传感器感知范围、通信能力和数据处理能力的限制，通常每个传感器节点所能感知的目标数量是有限的。在无线传感器网络目标覆盖中，如何在监测能力和传感器节点数量有限的前提下提高监测区域的目标覆盖率，是影响网络性能的重要因素，进而也会影响网络的生命周期。在无线传感器网络中，使用较少的节点工作可以减少通信跳数，降低数据冗余和通信干扰，降低能耗，从而提高网络的生命周期。可以考虑采用节点轮值的方法优化无线传感器网络的目标覆盖。采用节点轮值方法时，选择合适的节点工作和休眠是一个关键问题。

入侵杂草算法(Invasive Weed Optimization, IWO)是 C. Lucas 和 A. R. Mehraian 在 2006 年通过模拟自然界中杂草扩散入侵过程的随机搜索仿生优化算法^[1]。该算法是一种很强大的智能优化算法，易于理解、收敛性好、鲁棒性强、易于实现、结构简单等优点，目前，IWO 算法已成功应用于 DNA 序列

计算^[1]、线性天线设计、电力线通信系统资源分配、图像识别、图像聚类、约束工程设计、压电激励器放置等。

IWO 算法主要解决连续空间的浮点数问题，在离散空间中无法直接运用。然而在实际应用中，有许多问题，比如生物科学及计算机科学中的组合问题、背包问题等，只能在离散空间中才能解决。

为了在离散空间应用入侵杂草算法，将其进行改进，提出了一个二进制的入侵杂草算法，即 BIWO (Binary Invasive Weed Optimization algorithm, BIWO) 算法。本文用改进的二进制入侵杂草算法解决无线传感器网络的覆盖问题，采用了自适应标准差，能保证较快地收敛于全局最优解，能够选择合适节点进行休眠及激活，能够提高网络的覆盖率，延长网络的生命周期。

二、入侵杂草算法

1、入侵杂草算法的基本步骤

入侵杂草算法的实现通常也需要四个步骤，包括初始化杂草种群、繁殖、空间扩散分布、竞争性排

斥规则^[2]。

(1) 初始化种群

设置入侵杂草算法的相关参数，设定最大种群规模 $P_{\max}$ ，初始化种群数 N_0 ，所求问题维数 d ，最大迭代次数 $iter_{\max}$ ，繁殖的种子数的上下限 $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ ，非线性调和因子 n 。

(2) 繁殖

杂草在进化过程中所产生的种子数目与杂草的适应度值是呈线性相关的关系^[3]。每个杂草产生的种子数的表达式为：

$$m = S_{\min} + \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}(S_{\max} - S_{\min}) \quad (1)$$

其中： f —当前杂草的适应度值；

$f_{\min}$ —当前种群中杂草的最小适应值；

$f_{\max}$ —当前种群中杂草的最大适应值；

$S_{\min}$ —一个杂草所能生成种子的最小数量；

$S_{\max}$ —一个杂草所能生成种子的最大数量。

当前种群中杂草适应度值范围为 $[f_{\min}, f_{\max}]$ ，一颗杂草所能繁殖种子的数量范围为 $[S_{\min}, S_{\max}]$ 。

(3) 空间分布

杂草产生的种子在父代个体的周围形成正态分布，其均值为零，标准差为 σ_{cur} 。随着进化次数的增加，标准差可按下式计算：

$$\sigma_{cur} = \frac{(iter_{\max} - iter)^n}{(iter_{\max})^n}(\sigma_{init} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (2)$$

其中， σ_{cur} —当前标准差；

$iter_{\max}$ —最大进化迭代次数；

$iter$ —当前进化迭代次数；

σ_{init} 和 σ_{final} —标准差的初始值和最终值；

n —非线性调和因子。

每轮进化对应的标准差并不一样，随着进化的进行，标准差从 σ_{init} 一直变化到 σ_{final} ；一般情况下设置为 $n=3$ 。

(4) 竞争性排斥规则

竞争性排斥规则是经过多次进化之后，当种群规模达到 $P_{\max}$ ，按照适应度值大小对所有的个体进行排序，淘汰适应度较差的个体，保留其余个体。

重复以上四步直至达到最大迭代次数。

2、入侵杂草算法的收敛性

对智能优化算法我们要考虑它的收敛性，根据 C. Lucas 和 A. R. Mehrabian 的研究，要提高入侵杂草算法的搜索到最优解成功率，把杂草种群的规模扩大并不能起明显作用，而非线性调和因子 n 对入侵杂草算法的收敛起着至关重要的作用^[2]。入侵杂草算法在不断迭代的过程中，适应度值优的个体，将繁殖许多相类似的个体，同时适应度值较差的个体也会有产生子代的机会，且与子代个体一起执行竞争性排斥规则^[4]。繁殖的子代个体是随机地散布在父代个体周围呈现正态分布的方式，根据正态分布的特点，这种方法产生的子代大多在上一代适应度值较优的个体附近集中，为了实现种群多样性，同时对上一代适应度值较优的个体附近以外的区域也能兼顾。

三、杂草入侵算法离散化

1、入侵杂草算法离散化算法流程

BIWO 算法的实现步骤和 IWO 算法类似，也分为四个步骤：

(1) 初始化二进制种群

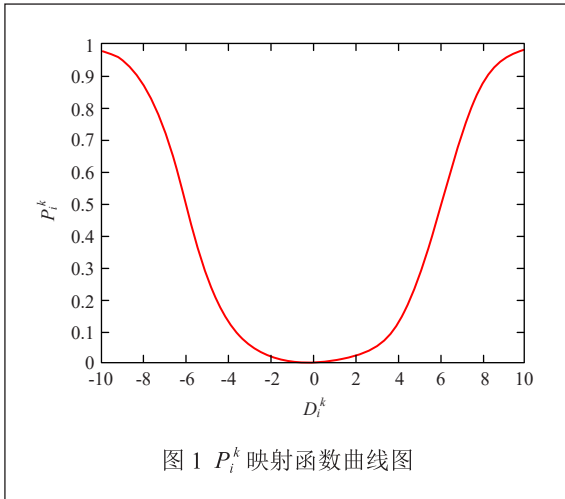
对实际问题采用适当的编码方法，每个杂草均为由随机函数产生一个二进制编码序列。单个杂草使用序列 $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1}, x_n)$ 来表示，其中 x_i 为杂草的比特位，其值只能取 1 或 0。

(2) 产生种子

与 IWO 产生种子的方法一样，即利用式 (1) 计算杂草的繁殖的种子数目。

(3) 二进制空间扩散

在取值连续的入侵杂草算法中，杂草种子个体仅在其父代个体周围以 0 为均值，标准差为 σ 随机的正态扩散分布。但是这种扩散方法并不能直接在 BIWO 算法中应用，我们使用变异机制去产生和扩散种子。在 BIWO 算法中，在整个的迭代过程中，标准差 σ 也将采用和 IWO 算法类似的变化过程。产生的扩散值通过特定的映射产生变异概率后作用于父代杂草的比特位，并不是直接作用于杂草个体。种群在当进化进行到第 k 轮时，对于当前种群中某个杂草的某个比特位 x_i^k ，当前正态分布标准差为 σ_k ， D_i^k 是根据正态分布随

图 1 P_i^k 映射函数曲线图

机函数 $N(0, \sigma_k^2)$ 得到的其对应扩散值, 设计的映射函数为式 (3)。父代种子的每一位可以通过式 (3) 计算变异概率。式 (3) 所对应的映射函数曲线见图 1。

$$P_i^k = f(D_i^k) = \frac{1}{1 + e^{-D_i^k + 6}} + \frac{1}{1 + e^{D_i^k + 6}} \quad (3)$$

当杂草二进制序列每位变异概率计算后, 当计算杂草所代表的每一位的变异率时, 一个相同的在 $[0, 1]$ 上的随机分布数值会产生, 从而可以通过公式 (4) 计算具体的变异的位:

$$\overline{D}_i^k = \begin{cases} 1, & \rho < f(D_i^k) \\ 0, & \rho \geq f(D_i^k) \end{cases} \quad (4)$$

$$x_i^{k+1} = \text{mod}(x_i^k + \overline{D}_i^k, 2)$$

其中, $\rho \in [0, 1]$ 之间的随机数。

(4) 竞争排斥规则

采用与入侵杂草算法一样的方式, 每轮迭代后种群按适应度大小排序, 种群规模保持不变。

2、开拓能力和开发能力

为了保证算法较快收敛到全局最优解, 我们必须考虑算法的开发能力和开拓能力。算法在某个较小的区域里进行彻底搜索能力称为开发能力, 算法在整个搜索空间中开拓新区域能力称为开拓能力。入侵杂草算法同时具有这两种能力。在迭代初期, 设置较大的 σ_i 值, 使种子个体散布到距离父代很远的地方, 此时算法很强的扩散能力, 种群有较大的多样性, 即开拓能力较强; 当种子进化到后期时, 逐渐减小 σ_i 值, 从

而种子的扩散范围也相应地缩小, 原先的优势群体繁殖产生更多的后代, 因为种群的规模是不变的, σ_i 值减小会造成优势个体的后代由于扩散半径较小, 生存能力更强, 从而可以在适应度值较好的局部区域搜索, 从具有较强的开拓能力逐渐变成有较强的开发能力^[3], 搜索范围从全局也能逐渐变化到局部区域。

3、标准差取值

在入侵杂草算法中, σ_i 会直接影响杂草个体的扩散范围。若 σ_{fin} 较大, 将导致后期的 σ_i 较大, 增大了种群的多样性, 但是会使算法不能有效地进行局部开发, 较长时间停留在全局开拓阶段, 从而增大了搜索全局最优解的难度; 若 σ_{ini} 较小, 将导致初期的 σ_i 较小, 表现为初始搜索范围较小, 使种群的多样性小, 同样使搜索全局最优解存在较大的困难。不同的实际问题往往千差万别, 故必须依据实际问题预估 σ_{ini} 和 σ_{fin} , 来确定其对开发精度和开拓范围的要求, 以便更好地搜索到全局最优解, 更加恰当地解决实际问题。

从上面我们知道, σ_{cur} 定义了算法的开发和开拓能力, 对最终的结果有极大的影响, 很好的多样性能使算法搜索到全局最优解, 算法通过该参数能够确定全局最优解的位置, 适当的集中能够使算法开拓有潜在最优解的区域而得到全局最优解。它会增加算法的收敛速度和找到更优的最终解。因此, 保持算法的多样性和集中的平衡是很重要的。但是若使用了固定的 σ_{cur} 去产生每个杂草的种子导致缺乏在开发性和开拓性之间的平衡。

为了克服以上的缺点, 我们采用自适应的分散机制。保证 σ_{cur} 在当前一代线性分布, 最大的适应值获得最小的 σ_{cur} , 最小的适应值获得最大的 σ_{cur} 。j 是根据他们适应值大小分类的杂草的编号。 σ_{cur} 能够通过公式 (2) 计算, P_{sum} 是当前这一代的杂草的数量, σ_j 是第 j 个杂草的 σ_{cur} 。因此, 较低适应度的杂草能够在当前这一代产生较好的种子, 另外, 这样增加了算法的多样性, 因此算法能够更有效地搜索空间。

$$\sigma_j = \sigma_{cur} \frac{j}{P_{sum}} \quad (5)$$

改进的 BIWO 算法的伪代码如下:

1. 用二进制序列随机产生杂草 P_0 ;

2. For $iter < iter_{max}$ 执行下一步;
3. 通过公式 (9) 计算每个杂草的适应度;
4. 对这些适应度进行分类;
5. 记录最大的和最小的适应度值;
6. 计算种子的数目 Num ;
7. 通过公式 (2) 和 (5) 计算每个种子的标准差;
8. 通过公式 (4) 产生种子;
9. 把种子加入种群;
10. If($Num > P_{max}$), 执行下一步;
11. 对种群依据适应度值进行分类;
12. 保存适应度值最好的杂草直到 $Num = P_{max}$;
13. End if;
14. End for。

四、基于 BIWO 算法的 WSN 目标覆盖优化

1、无线传感器网络节点部署模型

现在假定在 $F_x \times F_y$ 的二维平面区域内开始随机布置 N 个传感器节点, 同时有 M 个随机或者通过某种特定的方式选出来的需要监视的目标点, 同时有一个 Sink 节点。同时, 有一些独立的需要监视的目标点 POI (points of interest), 在整个网络的生存期内, 这些目标点必须被至少一个的传感器节点监视。采用二进制编码表示节点的状态, 节点休眠时, 用“0”表示; 节点处于激活状态时, 用“1”表示。整个无线传感器网络节点的工作状态用一个二进制串表示。这种表示方法简洁易懂。

(1) 能量消耗模型

我们要考虑无线传输的能量消耗, 其他比如接收数据、访问内存的能量消耗在此忽略不计。

$$E_{Tx}(d, H) = E_{elec} \times H + E_{amp} \times H \times d^\beta \quad (6)$$

$$E_{Rx}(d, H) = E_{elec} \times H \quad (7)$$

其中, E_{Tx} 和 E_{Rx} —传送和接收一个 H 位的数据包的能量消耗;

E_{elec} —发送和接收一位数据的能量消耗;

E_{amp} —每位数据进行功率放大的损失;

β —路径能量损耗的指数。

(2) 无线传感器的二进制模型

我们使用一个变量 γ_{ij} 代表一个传感器节点 i 能否

覆盖某个为 j 的 POI。若一个 POI 位于一个传感器节点的感知范围 γ_s 内, γ_{ij} 为 1, 否则取 0。可以定义为:

$$\gamma_{i,j} = \begin{cases} 1, & (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 < r_s^2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

其中, (x_i, y_i) 和 (y_i, y_j) —传感器节点 i 和目标 j 。

2、适应度评价函数

我们设定两个相关的参数 ϵ_x 和 γ_x , 分别代表在当前杂草 x 覆盖比例和可用的节点数, 因此适应度函数可以表示如下:

$$f(x) = \alpha_1 \cdot \rho_x^{\beta_1} - \alpha_2 \cdot \epsilon_x^{\beta_2} \quad (9)$$

其中, α_1 和 α_2 —权重系数;

β_1 和 β_2 —指数因子。

通过调整权重系数和指数因子, 可以确定相应的适应度。 A_i 代表杂草二进制序列的每一位, 其取值是 0 或者 1。我们可以通过下列公式计算 ρ_x 和 ϵ_x :

$$\rho_x = \sum_{j \in M} (1 - \prod_{i \in N} A_i \cdot (1 - \gamma_{i,j})) \quad (10)$$

$$\epsilon_x = \sum_{i \in N} A_i \quad (11)$$

如果杂草 x 有较大的适应度, 表明此时能监视更多的目标区域。 ρ_x 越大, 适应度越大; 而 ϵ_x 越小, 适应度越大。在搜索的过程中, 每个杂草都需要按照适应度值大小进行排序。

五、仿真实验

为了检验该算法的性能, 采用 Matlab 对算法应用于无线传感器网络的目标覆盖问题进行仿真实验。

1、参数设置

我们需要在大小不同规模的无线传感器网络评价入侵杂草算法的收敛性。我们可以设置目标点 $m=64$ 随机地分布在 $100m \times 100m$ 的监控区域内, 随机分布的传感器节点数目为 50~500, 节点的感知半径 r_s 为 17.675m。数据包的大小为 H 位。

E_{elec} —发送和接收一位数据的能量消耗;

E_{amp} —每位数据进行功率放大的损失;

β —路径能量损耗的指数;

α_1 、 α_2 —适应度函数权重系数;

β_1 、 β_2 —适应度函数指数因子。

主要参数设置如表 1。

表 1 实验参数设置

参数	取值
H	2000
E_{elec}	50nJ/bit
E_{amp}	100pJ/bit/m ²
β	2
α_1	1
α_2	1
β_1	2
β_2	0.5

2、与遗传算法比较收敛性

图 2 清晰的表明入侵杂草算法优于遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)，因为二进制入侵杂草算法 BIWO 能够更好地布置节点，在散布 500 个节点的情况下，平均的适应度比 GA 提高了 52.8%，同时杂草入侵算法比 GA 需要更短的收敛时间。但是随着需

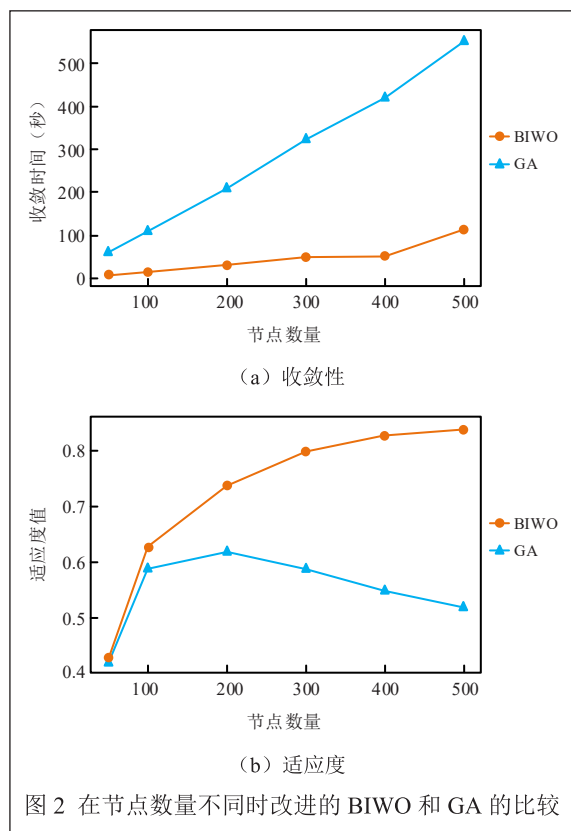


图 2 在节点数量不同时改进的 BIWO 和 GA 的比较

要散布的节点数目增加，平均的收敛时间也随之增加。这是因为节点数目和目标点的增加，增大了问题的复杂度。这个现象在应用 GA 时更加明显。

3、覆盖保持和网络生存时间的延长

延长无线传感器网络的生存时间，提高它的覆盖度一直是无线传感器网络研究的重要目标。在图 3 中可以看到，随着无线传感器网络节点数目的增多，对目标点的完全覆盖能够持续更长的时间。因为当出现死亡节点时，能够唤醒合适节点的概率更大。若所有的节点在一开始全部激活，覆盖比率下降的很快。很多节点很快就耗尽了能量。通过采用改进的二进制杂草入侵杂草算法，网络的寿命得到了显著的提高。同样表明，杂草入侵算法适用于不同的网络规模。

六、结束语

无线传感器网络覆盖控制问题是当前学者们研究的一个热点问题。本文研究在无线传感器的目标覆盖中如何提高覆盖的质量和效果，延长网络的生命周期。

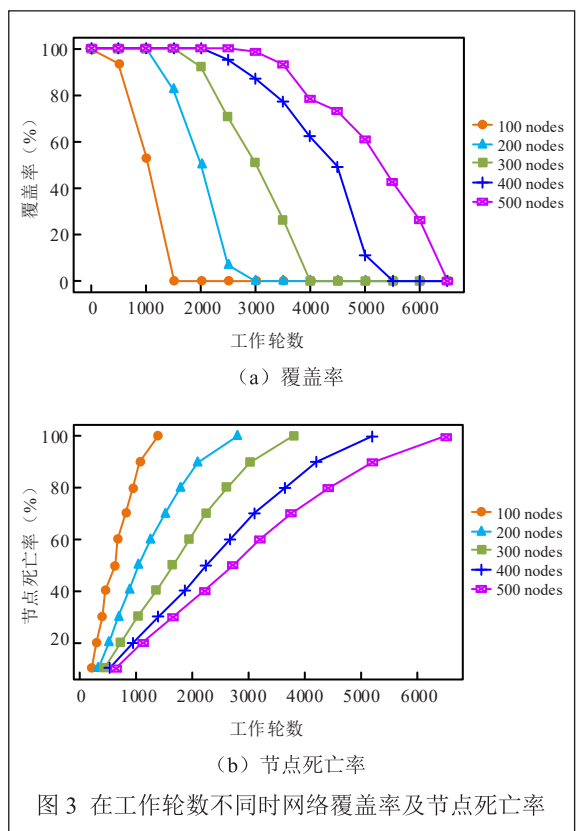


图 3 在工作轮数不同时网络覆盖率及节点死亡率

在入侵杂草算法的基础上,把入侵杂草算法二进制化,并在生成种子时采用自适应的扩散机制。仿真结果表明,相比 GA,此算法在收敛性和延长网络的寿命上具有明显的优势,且能够提高目标的覆盖度。

参考文献

- [1] 韩毅,蔡建湖,李延来等. 野草算法及其研究进展 [J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 20-23.
- [2] 张帅,王营冠,夏凌楠. 离散二进制杂草入侵算法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 55-60.
- [3] 陈欢,周永权,赵光伟等. 基于混沌序列的多种群入侵杂草算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1952-1961.
- [4] 赵小强,周金虎,杨佳敏. 一种基于 IWO 的数据挖掘模糊聚类算法 [A]. 见:第 32 届中国控制会议论文集 [C]. 西安: IEEE ComputerSociety, 2013, 7988-7993.
- [5] Habib S J, Marimuthu P N. Data aggregation at the gateways through sensors' tasks scheduling in wireless sensor networks[J]. Wireless Sensor Systems, IET, 2011, 1(3): 171-178.

Research on WSN Coverage Based on an Improved Binary Invasive Weed Optimization Algorithm

ZHANG Gui-qin

(PLA 61112, Mudanjiang 157011, China)

Abstract: An optimization method for WSN coverage is designed based on binary invasive weed optimization algorithm(BIWO) in this paper. Firstly, the weed coding and the weed update method are optimized on the basis of the original invasive weed algorithm(IWO). The weed consists of a string of binary codes. The mutated probability of each bit in the parent weed is calculated with the specific function, based on which the seeds are produced. Secondly, in order to overcome the shortcomings of the invasive weed algorithm, the generation of weed population adopts adaptive standard deviation. Different optimization strategies are compared and the results show that BIWO algorithm has quicker convergence speed, improves coverage ratio remarkably, and prolongs the lifetime of WSNs.

Key words: Invasive Weed Optimization (IWO); binary coding; adaptive standard deviation; WSN

作者简介

张桂琴, 61112 部队, 硕士, 工程师, 研究方向为无线传感器网络。

通信地址: 黑龙江省牡丹江市爱民区西地明街 69 号

邮编: 157011

邮箱: 690598243@qq.com