

布谷鸟算法在无线传感器网络中的定位研究

李娜, 贾伟

(陕西理工大学数学与计算机科学学院, 汉中, 723000)

摘要: 无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)中的核心技术之一就是节点定位。不同的定位方法对定位结果有不同的影响。针对最小二乘法在求解未知节点位置过程中定位精度的不足, 提出一种WSN节点定位算法——基于改进的布谷鸟搜索算法(Cuckoo search, CS)的定位算法。首先根据优化目标建立数学模型, 然后设计了布谷鸟搜索算法中的适应值函数, 并修改步长和拒绝概率参数, 快速确定未知节点坐标位置。数字仿真实验表明: 与基于距离向量跳数的定位方法(Distance vector hop, DV-HOP), 基于自适应的布谷鸟搜索和距离向量跳数的定位算法(Self-adaption cuckoo search and distance vector hop, SACSDV-HOP)进行比较, 本文算法可以有效提高节点定位精度, 降低定位误差, 具有较高的实用性。

关键词: 节点定位; 无线传感器网络; 最小二乘法; 布谷鸟搜索算法; 智能优化

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Localization of Cuckoo Algorithm in Wireless Sensor Network

LI Na, JIA Wei

(School of Mathematics and Computer Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, 723000, China)

Abstract: Node localization is one of the core technologies in wireless sensor network (WSN). Different localization methods have different effects on localization results. In response to the deficiency in accuracy of localization during the process of searching for the unknown node localization with the least-square algorithm, a localization algorithm is proposed based on improved cuckoo search (CS) algorithm. The first step is to establish the mathematical model according to the optimization objective, and then we design the fitness function of cuckoo search algorithm. Finally, we modify the parameters of the step length and rejection probability and thus determine the coordinate position of the unknown nodes quickly. The simulation results show that the proposed algorithm is better than the distance vector hop (DV-HOP) and the self-adaption cuckoo search and distance vector hop (SACSDV-HOP) algorithms. The algorithm can effectively reduce the error of localization in WSN and improve the accuracy in locating nodes. Accordingly, it has high practicability in WSN node localization.

Key words: node localization; wireless sensor network (WSN); least-square algorithm; cuckoo search (CS) algorithm; intelligent optimization

引言

无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)是当今在国际上备受关注、多学科高度交叉和知

识高度集成的前沿热点研究领域^[1]。WSN是由大量小型或者微型传感器组成的互连网络,这些微型传感器一般称之为感知节点。WSN中感知节点的定位具有特殊的意义,只有这些节点明确自身的位置,才能为用户提供有用的信息。因此,节点定位技术是WSN中许多应用的关键支撑技术之一,是目标跟踪与导向、定向信息的查询与传递、协助路由并实现路由协议、网络拓扑控制和网络覆盖控制等技术的重要基础,节点的定位信息非常重要^[2-4]。

目前,在无线传感器网络中存在各种各样的节点定位方法。在定位过程中,如果借助于特定硬件测量出节点间的角度或者距离,那么称其为基于测距的定位方法;不通过测距,而是直接使用节点之间跳数的定位,称其为非测距的定位方法^[5]。采用的测距技术主要有接收信号强度指示(Received signal strength indicator, RSSI)^[6],接收信号传播时间(Time of arrival, TOA)和接收信号传播时间差(Time difference of arrival, TDOA)^[7]等,它们的定位精度较高,但成本、功耗也相对较大,在实际应用中并无太大优势;相反,不需要测距硬件的定位方法,可以节约成本,应用也较广泛,其最常用的方法有质心定位^[8]、基于距离向量跳数的(Distance vector hop, DV-HOP)定位^[9-11]等算法,但它们存在定位精度相对较低或者通信开销过大等缺点。

许多研究人员为降低误差并提高定位精度提出引入群体智能优化算法对非测距方法进行改进。文献[12]利用和声搜索算法(Harmony search, HS)实现节点定位,其仿真数据表明该算法在定位精度、运行性能方面的效果较好。文献[13]混合粒子群和差分进化算法实现节点定位,实验结果表明该方法有更高的定位精度和更强的抗误差性能。文献[14-17]利用布谷鸟算法以及布谷鸟算法的变体实现节点定位,均取得了一定的效果。这几种算法在一定程度上提升了定位性能并降低误差,但是定位精度和误差方面仍然可以进一步改进。因此,研究一种性能较好、效率较高的智能算法尤其重要。

本文提出一种基于布谷鸟搜索(Cuckoo search, CS)算法^[18]的WSN节点定位智能优化算法。通过引入全局和局部搜索能力较强的CS算法,并对步长和拒绝概率参数进行改进,求得未知节点位置坐标的估算与修正。最后通过MATLAB仿真实验,从多个方面与其他算法进行比较,结果表明本文算法与DV-HOP算法、文献[17]中(Self-adaption cuckoo search and distance vector hop, SACSDV-HOP)算法相比,可以有效地提高WSN中未知节点的定位精度,降低定位误差,是一个较好的WSN节点定位解决方法。

1 WSN中未知节点定位模型

WSN是由许许多多的无线传感器节点组成。在节点的定位过程中,找到未知节点的具体位置坐标常采用的算法是:由少量的已知其位置的节点(即锚节点)和节点间的距离来估算。假设WSN中未知节点 U 的坐标为 $U(x, y)$,锚节点 A_i 的坐标为 $A_i(x_i, y_i)$, U 和 A_i 之间的距离为 d_i ,其中 $i=1, 2, 3, \dots, n$,那么存在

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_1 \\ \vdots \\ \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2} = d_n \end{cases} \quad (1)$$

式中的方程组做减法后可表示为线性方程组 $\mathbf{AX} = \mathbf{b}$,其中 \mathbf{A} 为矩阵, \mathbf{b} , \mathbf{X} 为向量,分别由式(2)–(4)计算。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ \vdots \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用最小二乘法可以得到未知节点 U 的坐标为

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (5)$$

式中: b 向量中每一个元素均包括距离 d_n , 要使未知节点的坐标位置准确, d_n 值的误差就必须达到最小, 即 $(b - AX)$ 的取值应为最小。为了提高网络中未知节点的定位精度并求解出 U , 目标函数可以定义为

$$\text{Fitness}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - d_i^2} \quad (6)$$

通过式(6)可以看出, 当函数值越接近于0, 所对应的解越接近未知节点的具体坐标位置。相应地, 在 WSN 中未知节点定位实际上就是在式(6)的一组可行解中求解最优解的过程。

2 基于CS算法的节点定位过程

CS算法借助模拟布谷鸟的寄生育雏的繁殖策略, 利用随机或者类似随机的飞行方式进行全局搜索, 寻得问题的最优解。

2.1 CS算法

Yang等^[18]模拟布谷鸟寻找鸟巢的策略, 即通过随机或者类似随机的飞行方式, 大自然中的布谷鸟来找寻适合自己产卵的鸟巢位置。首先需要假设3个理想状态规则^[18-19]: (1)每1只布谷鸟每一次只产1个卵, 随机选择1个鸟巢堆放并孵化; (2)从随机选择的1组鸟巢中选择位置最优的, 这个最优的鸟巢会被保留到下一代; (3)在寻找鸟巢的过程中, 可供选择的鸟巢数量 N 是固定的, 一个鸟巢的主人会发现外来鸟蛋的概率为 $P_a \in [0, 1]$ 。在这种情况下, 鸟巢的主人可以有两种策略: “丢弃该蛋”或者“放弃旧巢并另建新巢”。

由以上3条理想化规则, 可以用式(7)表示布谷鸟寻找鸟巢的位置和路径的更新, 即

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \partial \oplus L(\lambda) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

式中: x_i^{t+1} 表示新的鸟巢的位置; x_i^t 表示第 i 个鸟巢在第 t 代中的位置; ∂ 表示步长因子, 它的值大于0, 随机搜索的范围由它来控制; \oplus 表示点对点的乘法; $L(\lambda)$ 是 Levy 随机搜索路径, 其搜索路径与时间 t 服从莱维分布。通过式(7)进行位置更新后, 生成随机数 $r (r \in [0, 1])$, 并比较 r 与 P_a 的大小。如果 $r < P_a$, 就对鸟巢的位置进行一次随机更新, 否则鸟巢位置不发生变化。

2.2 布谷鸟求解 WSN 定位问题分析

从上述描述中可以看到, CS算法包含参数较少, 容易实现。其核心是利用莱维飞行机制寻找鸟巢位置, 有着很好的全局和局部搜索能力。莱维飞行是一个随机游走的过程, 主要是由小步长短距离飞行和大步长的长距离飞行构成, 前者频率高, 后者具有偶然性。因此, 最优的鸟巢即最优解与步长大小、 P_a 有密切关系, 会直接影响算法性能。假如 P_a 值低, 步长值大, 则可能将新的布谷鸟蛋放置于边界之外, 从而使 CS 算法效率低、收敛速度较慢。如果 P_a 值高, 步长值小, CS 算法会很快收敛, 但是在迭代过程中新解和上一个解的位置比较接近, 会有很大的风险避开最优解, 陷于局部最优。为了得到质量好的最优解, 有大量研究人员对算法进行改进, 弥补标准 CS 算法的不足。特别是标准 CS 算法没有任何参数控制策略, 自适应参数化 CS 算法^[20-27]得到了研究者的广泛关注。其中文献^[23]能有效避免陷入局部最优, 显著减少进化过程并提高收敛速度; 文献^[27]得到优于其他自适应 CS 算法的解决方案。

因此, 使用一种性能较好、效率较高的自适应 CS 算法来提升定位精度并降低误差是必要的。本文

通过文献[27]的方法来调整步长参数,即由式(8)来改变步长 step_i 。

$$\text{step}_i(t+1) = \frac{\text{dist}_i}{\text{dist}_{\max}} \times e^{\left(\frac{\text{Rank}(f_i(t))}{n}\right)} - \frac{\ln t}{\ln t_{\max}} \quad (8)$$

式中: dist_i 为第 i 个鸟巢到具有最佳适应值的布谷鸟巢的当前距离; dist_{\max} 为这一代中的一个鸟巢到最佳布谷鸟巢的最大距离; Rank 为被定义的相对于整个种群适应值的等级; t 为当前迭代次数; n 为种群的大小。

步长公式改变后,布谷鸟巢位置更新可由式(9)计算。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \text{rand} \times \text{step}_i^{t+1} \times x_i^t - x_{\text{gbest}} \quad (9)$$

式中: rand 为一个随机数,根据当代种群和最优个体,产生对应的新种群,最终实现迭代优化; x_{gbest} 为最佳种群。

2.3 参数 P_a 的改进

P_a 参数的选取直接影响算法的性能,涉及到布谷鸟巢是否要更新。文献[23]采用一种静态学习策略:根据每个个体在前一阶段中的更新成功率来选取一个合适的参数 P_a 。两个参数 P_a 的选取可以由表示为

$$P_a = 0.05 + 0.15 \times \text{rand} \quad (10)$$

$$P_a = 0.85 + 0.05 \times \text{rand} \quad (11)$$

式(10)参数 P_a 的取值较小,可能会增强算法搜索停滞的可能性,减慢搜索速度;式(11)中参数 P_a 的取值较大,可以提高算法中种群的多样性,并加快收敛速度。在 WSN 节点定位中,根据需要选取一个合适的 P_a 来提高定位性能。在算法执行初期,等概率选择式(10)或式(11)作为个体的变异选择概率 P_a ,随后统计每个个体根据式(10)或式(11)进行变异操作的更新成功率,由不同的成功率来决定下一次迭代中每个个体选择采用式(10)或式(11)作为新参数 P_a 的概率。

2.4 布谷鸟搜索节点定位算法

根据上述过程,利用 CS 节点定位,就是求解搜索区域中的一个鸟巢位置,即函数优化问题中每一个可行解。在 CS 的每一次迭代中,必须设定一个适应值函数来判定鸟巢位置的优劣,可设置适应值函数为

$$\text{Fitness}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - d_i^2}$$

要使所求的未知节点越接近真实节点的位置,问题转化为智能优化问题,当函数值最小时,未知节点的估计位置越接近真实位置,定位精度越大。其算法描述如下:

Step 1 定义问题和参数值。主要参数包括发现概率 P_a 和鸟巢的数量 N 。其中 N 个鸟巢的位置随机生成,鸟巢的位置对应传感器的坐标。

Step 2 初始化鸟巢的位置,根据式(6)计算出当前最好的鸟巢位置和其对应的最优适应值,并保存下来。

Step 3 根据式(9)产生新一代鸟巢的位置 x_i 。计算出新的鸟巢适应值与上一代最优适应值进行比较,将适应值最好的鸟巢位置 x_T 保留至下一代。

Step 4 发现概率 P_a 和所产生的均匀随机数 r 做对比。如果 $r < P_a$,则保留当前的最优解 x_T ;否则,通过随机扰动产生一个新的解 x_A 。

Step 5 评估 $f(x_T)$ 和 $f(x_A)$ 的优劣。用较少的定位误差的鸟巢位置代替误差较大的鸟巢位置,留下质量最优的鸟巢位置。

Step 6 判断是不是满足 WSN 节点定位的预测精度要求。若满足,此次搜索完成,输出全局最优

解对应的鸟巢位置坐标;否则,返回 Step 3 重新搜索到最大迭代次数 t_{max} 并输出最优解。

3 仿真实验及结果分析

为了验证CS算法在WSN节点定位中的有效性,将其与DV-HOP和SACSDV-HOP算法的定位性能进行比较。数值仿真实验通过Windows 10操作系统平台上的MATLAB2014b进行。实验中,设有多个无线传感器随机分布在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的二维区域中,其中包括多个锚节点和未知节点。相关算法重复运行100次之后取平均值,定位结果优劣的评价标准采用平均定位误差。采用式(12)进行定位误差计算。

$$NLE = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{n-m} \sum_{i=m+1}^n (P_i - P_i')^2} \times 100 \quad (12)$$

式中: R 为节点间的最大通信距离, n 为传感器总节点数, m 为锚节点个数, $n-m$ 为未知节点个数, P_i 为节点*i*的实际坐标, P_i' 为算法求出的节点坐标。

当锚节点为20、未知节点为180以及最大通信距离为30 m的情况下,3种算法从定位误差对比而言,通过修改CS算法的参数,可以减少传感器的定位误差,其结果如图1所示。

从图1可以看出,在相同的通信半径、锚节点数目和总节点数据的情况小,本文算法在总体平均定位精度和定位稳定性方面均优于其他两种算法。此外,为比较各个算法在不同通信状况下的定位性能,分别从:(1)在节点间的不同通信距离;(2)不同锚节点数;(3)不同节点数的情况下,仿真了各个算法的定位误差情况,结果如图2—4所示。

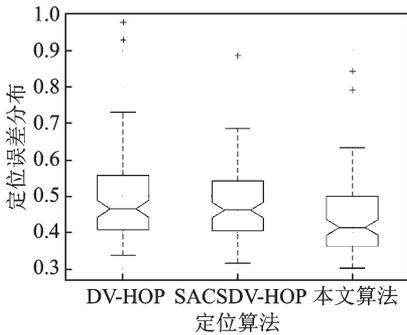


图1 不同算法的定位误差比较

Fig.1 Localization error comparison of different algorithms

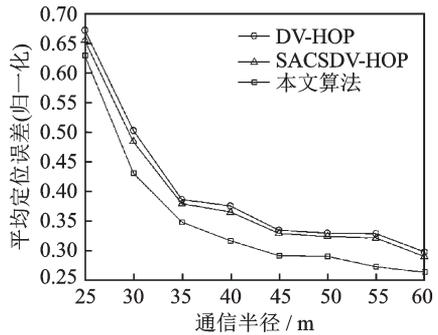


图2 不同通信距离定位误差比较

Fig.2 Comparison of localization errors in different communication distances

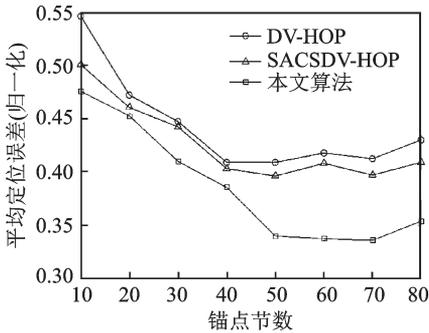


图3 不同锚节点数与定位误差

Fig.3 Points of different anchor nodes and localization errors

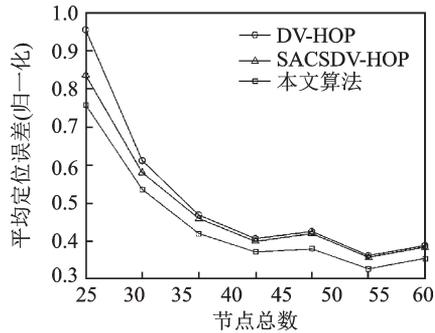


图4 不同节点数与定位误差

Fig.4 Different node numbers and localization errors

在图2中,当节点总数和锚节点数不变时,平均定位误差都随着通信半径的增大而逐渐减小,本文提出算法的定位精度优于DV-HOP和SACSDV-HOP算法。在图3中,当通信半径和节点总数保持不变时,算法的定位误差均随着信标节点数的增多而减小,但本文所提算法的定位精度优于DV-HOP和SACSDV-HOP算法。在图4中,在保持节点总数和通信半径不变时,算法的定位误差均随着节点总数的增多而减小,同样,本文所提算法的定位精度优于DV-HOP和SACSDV-HOP算法。

综上所述,可以得出在不同通信距离、不同锚节点数和不同总节点数的情况下,本文所提算法的定位精度都优于DV-HOP和SACSDV-HOP算法。

4 结束语

节点定位技术是WSN的核心技术之一。由于使用最小二乘法在求解未知节点位置过程中会导致定位精度较低,因此本文提出一种基于改进步长和 P_a 的CS算法的WSN节点定位算法。仿真实验结果表明:相对于DV-HOP和SACSDV-HOP算法,本文算法平均定位误差更小,并在一定程度上达到理想的定位精度和效果,具有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 杨博雄. 无线传感器网络[M]. 北京:人民邮电出版社, 2015: 1-2.
YANG Boxiong. Wireless sensor network[M]. Beijing: The Posts and Telecommunications Press, 2015: 1-2.
- [2] 孙泽宇,魏巍. 一种改进无线传感器网络定位算法的研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(9):125-127, 135.
SUN Zeyu, WEI Wei. Research on algorithm of coverage control in wireless sensor network[J]. Computer Simulation, 2010, 27(9):125-127, 135.
- [3] 李建坡,时明,钟鑫鑫. 自适应蒙特卡罗无线传感器网络移动节点定位算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(4): 1191-1196.
LI Jianpo, SHI Ming, ZHONG Xinxin. Self-adaptive Monte Carlo localization algorithm of mobile nodes in WSN[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(4): 1191-1196.
- [4] 魏叶华. 无线传感器网络中定位问题研究[D]. 长沙:湖南大学, 2009.
WEI Yehua. Research on localization in wireless sensor networks[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [5] DELIN K A, JAEKSON S P. The sensor web: A new instrument concept[C]//Proceedings of SPIE International of Optical Engineering. CA San Jose: International Society for Optics and Photonics, 2001: 1-9.
- [6] 汪明,许亮,何小敏. 无线传感器网络精度优选RSSI协作定位算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(7): 1981-1988.
WANG Ming, XU Liang, HE Xiaomin. RSSI collaborative location algorithm of selecting preference accuracy for wireless sensor network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(7): 1981-1988.
- [7] 罗敏. 浅析基于TOA/TDOA的无线传感器网络节点定位算法[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2009, 21(2): 41-43.
LUO Min. Node location calculation for TOA/TDOA-based wireless transducer network[J]. Journal of Wuhan Engineering Institute, 2009, 21(2): 41-43.
- [8] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(5): 28-34.
- [9] 郑久虎,钱焕延,高德民,等. 基于跳数修正的DV-Hop定位的改进算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(1): 63-67.
ZHENG Jiuhu, QIAN Huanyan, GAO Demin, et al. Improved DV-Hop positioning algorithm based on modifying hop counts [J]. Computer Science, 2013, 40(1): 63-67.
- [10] 王新生,赵衍静,李海涛. 基于DV-Hop定位算法的改进研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(2): 76-78, 90.
WANG Xinsheng, ZHAO Yanjing, LI Haitao. Improved study based on DV-Hop localization algorithm[J]. Computer Science, 2011, 38(2): 76-78, 90.
- [11] 刘少强,庞新苗,樊晓平,等. 一种有效提高节点定位精度的改进DV-Hop算法[J]. 传感技术学报, 2010, 23(8): 1179-1183.
LIU Shaoqiang, PANG Xinmiao, FAN Xiaoping, et al. Improved DV-Hop algorithm for higher positioning accuracy[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(8): 1179-1183.
- [12] 高凯,贾伟,雍龙泉. 基于和声搜索算法的WSN节点定位技术[J]. 微型电脑应用, 2015, 31(3): 50-53.

- GAO Kai, JIA Wei, YONG Longquan. Wireless sensor network based on harmony search of localization technology[J]. Micro-computer Applications, 2015, 31(3): 50-53.
- [13] 郑建国, 张学煜. 混合粒子群和差分进化的定位算法[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 192-195.
ZHENG Jianguo, ZHANG Xueyu. Hybrid particle swarm optimization and differential evolution based localization algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(10): 192-195.
- [14] 王小辉, 李圣普, 吕海莲. 基于布谷鸟算法的WSN节点定位研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(12): 208-211.
WANG Xiaohui, LI Shengpu, LV Hailian. Research on WSN node positioning based on cuckoo searching algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(12): 208-211.
- [15] 肖晓丽, 李旦江, 谭柳斌. 基于布谷鸟搜索算法的无线传感器网络节点定位[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(2): 141-145.
XIAO Xiaoli, LI Danjiang, TAN Liubin. Node localization of wireless sensor networks based on cuckoo search algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(2): 141-145.
- [16] 李旦江. 基于智能搜索策略的WSN定位算法研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
LI Danjiang. Research on WSN location algorithm based on intelligent search strategy[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [17] 王玉芳, 毛永毅. 基于改进布谷鸟算法的WSN节点定位算法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(11): 3412-3415.
WANG Yufang, MAO Yongyi. WSN node localization based on improved cuckoo search algorithm[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(11): 3412-3415.
- [18] YANG Xinshe, DEB S. Cuckoo search via levy flights[C]//Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing.[S.l.]:IEEE Publications, 2009: 210-214.
- [19] 张晓凤, 王秀英. 布谷鸟搜索算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(18): 8-16.
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Survey of cuckoo search algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(18): 8-16.
- [20] GANDINO F, FERRERO R, MONTRUCCHIO B, et al. Cuckoo search: A new nature-inspired optimization method for phase equilibrium calculations[J]. Fluid Phase Equilibria, 2013, 337: 191-200.
- [21] VALIAN E, TAVAKOLI S, MOHANNA S, et al. Improved cuckoo search for reliability optimization problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 64(1): 459-468.
- [22] ZHANG Z, CHEN Y. An improved cuckoo search algorithm with adaptive method[C]//Proceedings of 2014 Seventh International Joint Conference on Computational Science and Optimization(CSO). Beijing: IEEE, 2014: 204-207.
- [23] LI X, YIN M. Modified cuckoo search algorithm with self adaptive parameter method[J]. Information Sciences, 2015, 298(C): 80-97.
- [24] ZHAO H, JIANG Y, WANG T, et al. A method based on the adaptive cuckoo search algorithm for endmember extraction from hyperspectral remote sensing images[J]. Remote Sensing Letters, 2016, 7(3): 289-297.
- [25] MANOJ KUMAR N, RUTUPARNA P. A novel adaptive cuckoo search algorithm for intrinsic discriminant analysis based face recognition[J]. Elsevier B V, 2016, 38: 661-675.
- [26] MLAKAR U, JR I F, FISTER I. Hybrid self-adaptive cuckoo search for global optimization[J]. Swarm & Evolutionary Computation, 2016, 29: 47-72.
- [27] JABALLAH A, MEDDEB A. Self adaptive cuckoo search algorithm for RFID network lanning[C]//Proceedings of IEEE 2017 Internet Technologies and Applications(ITA).[S.l.]:IEEE, 2017: 122-127.

作者简介:



李娜(1979-),女,讲师,研究方向:计算机网络与应用、智能算法优化等,E-mail:ln1027@126.com。



贾伟(1977-),男,讲师,研究方向:计算机网络与应用、复杂网络与演化计算等,E-mail:jiawei@snut.edu.cn。