

基于改进人工萤火虫算法的无线传感网络覆盖优化

赖锦辉¹, 梁松²

(1. 广东石油化工学院 实验教学部计算机中心, 广东 茂名 525000;

2. 广东石油化工学院 计算机与电子信息学院, 广东 茂名 525000)

摘要: 为了提高网络资源利用率延长网络生存时间, 提出一种基于共轭梯度法改进人工萤火虫算法 (CAGSO) 的 WSN 覆盖优化方案; 共轭梯度法是利用目标函数的梯度逐步产生共轭方向并将其作为搜索方向的方法, 即利用已知点处的梯度构造一组共轭方向并沿这组共轭方向进行搜索, 这种方法经有限次迭代必达极小点; 首先建立以覆盖率、节点利用率和能量均匀为准则的覆盖优化数学模型, 然后采用改进的 CAGSO 算法求解该模型, 从而得出最优覆盖方案; 仿真分析说明, 相比基本人工萤火虫算法, 改进的 CAGSO 算法优化的网络覆盖率可以达到 94.11%, 有效实现 WSN 覆盖优化。

关键词: 无线传感网络; 共轭梯度; 人工萤火虫算法

Optimization Strategy of Wireless Sensor Networks Coverage Based on Improved Artificial Glowworm Swarm Optimization Algorithm

Lai Jinhui¹, Liang Song²

(1. Computer Center, Department of Experiment Teaching, Guangdong University of Petrochemical Technology,

Maoming 525000, China; 2. College of Computer and Electronic Information, Guangdong University of

Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: In order to improve the utilization of network resources and prolong the network lifetime, a wireless sensor network coverage optimization Strategy is proposed based on artificial glowworm swarm optimization algorithm (CAGSO). Conjugate gradient method is the use of the gradient of the objective function to construct a set of conjugate direction, and then search along the conjugate direction, this method can get minimum through finite iterations. Firstly, a model of coverage optimization in WSNs is built up by taking network coverage rate, node utilization and node uniformity as the criterion, and then the CAGSO is used to solve the model, and finally got the coverage optimal Strategy. The simulation results show that: compared to the basic AGSO, the CAGSO optimize the network coverage to 94.11%, it can effectively provide the optimal solution of network coverage.

Key words: wireless sensor network; conjugate gradient method; artificial glowworm swarm algorithm

0 引言

网络覆盖优化^[1]是指合理部署节点同时又能获得尽可能大的覆盖质量, 提高网络资源利用率。优化网络覆盖对于节约资源、最大化获取信息、控制网络成本和减少节点冗余等任务具有重要意义。

目前, 国内外学者在 WSN 覆盖优化算法的研究和进展主要如下: 文献 [2] 中提出了一种可移动节点的最大覆盖区域的方案, 建立靠近和远离两种模式, 通过节点之间的距离调整节点位置; 文献 [3] 通过改进粒子群算法实现覆盖优化策略, 并分析了传感半径对覆盖性能的影响; 文献 [4] 通过改进遗传算法来实现覆盖优化方案, 源于遗传算法的有效的并行搜索能力和全局搜索能力。此外还出现了基于微粒群算法、鱼群算法及蚁群算法等 WSN 覆盖优化方法。这些算法均有不足, 如蚁群算法的不足在于初期寻优速度较慢、缺乏信息素初始机制; 遗传算法的不足在于后期进化收敛速度大大下降, 难以满

足动态节点选择的及时性, 且容易趋向局部最优; 可移动节点的最大覆盖区域方案的缺点则是随着节点数增加, 计算量将变得相当大。

印度学者 Krishnanad 等在 2005 年提出人工萤火虫 (Artificial Glowworm Swarm Optimization, AGSO) 算法, 思想是模拟自然界中萤火虫的觅食行为。该算法优点是实现简单、搜索自适应性和通用性强。当前 AGSO 算法的研究已用于解决各种组合优化问题中, 如多模函数优化、聚类分析和数值优化等并取得了较佳效果。初步研究表明, AGSO 算法是有竞争力的, 且尤其适合连续型论域的目标函数优化问题, 在 WSN 网络覆盖优化问题, 虽然传感器节点是彼此独立的, 但在监控区域范围内, 其位置变化是连续的, 所以 WSN 网络覆盖优化实质上可以转化为连续目标函数优化问题。

人工萤火虫算法收敛率低, 容易早熟, 因此本文提出了一种优化方法: 基于共轭梯度法改进人工萤火虫算法 (CAGSO), 共轭梯度法是利用目标函数的梯度逐步产生共轭方向并将其作为搜索方向的方法, 即利用已知点处的梯度构造一组共轭方向 (即当函数维数为 d 时, 需产生 d 个线性无关相互共轭的搜索方向), 并沿这组共轭方向进行搜索, 这种方法经有限次迭代必达极小点。首先建立以覆盖率、节点利用率及能量均衡为准则的数学模型, 然后用改进的 CAGSO 对该模型进行求

收稿日期: 2013-12-21; 修回日期: 2014-02-08。

作者简介: 赖锦辉 (1977-), 女, 广东茂名, 硕士, 讲师, 主要从事网络、算法及人工智能等方向的研究。

梁松 (1974-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 实验师, 主要从事算法和人工智能方向的研究。

解。仿真分析说明,相比基本人工萤火虫算法,改进的 CAGSO 算法优化的网络覆盖率可以达到 94.11%,有效实现 WSN 覆盖优化。

1 建立 WSN 覆盖优化数学模型

1.1 问题描述

设二维待测区域 Z 内随机播洒 N 个传感器节点,节点坐标 (x_i, y_i) ,节点通信半径 r_c ,节点感知半径 r ,则节点 (x_i, y_i) 的覆盖模型可看成是一个以 r 为半径、节点坐标为圆心的圆,即 $s_i = (x_i, y_i, r)$,节点集合为 $S = \{s_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 。设监测区域数字离散化成 $m \times n$ 个像素,目标像素点 p 坐标为 (x, y) ,则 p 被 s_i 所覆盖的概率如下:

$$C_p(s_i, x, y) = \begin{cases} 1 & d(s_i, p) \leq r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $d(s_i, p)$ 是 s_i 到 p 的欧几里得距离。

所有监测区域的节点对 p 进行同时检测的联合测量概率如下:

$$C_p(S) = 1 - \prod_{s_i \in S} (1 - C_p(s_i, x, y)) \quad (2)$$

1.2 覆盖优化数学模型

首先,定义所有节点的覆盖面积与监测区域的总面积之比为区域覆盖率 μ ,则 μ 为:

$$\mu = \frac{\sum_x \sum_y C_p(S)}{m \times n} \quad (3)$$

网络覆盖优化问题的一个方面就是要使得 μ 极大化。

其次,考虑到节点有工作和休眠两种状态,因此节点的利用率 φ 为:

$$\varphi = \frac{|S'|}{N} \quad (4)$$

其中: $|S'|$ 为处于工作状态的节点数。

网络覆盖优化问题的另一个方面就是要使得 φ 极小化。

最后,为了使得网络能量消耗相对均衡,用节点间距离的标准差来定义网络均匀度 δ 。对于节点 s_j ,定义其感知邻居集为:

$$A(j) = \{k \in S \mid s_j - s_k \leq 2r, j \in S, k \neq j\} \quad (5)$$

则网络均匀度 δ 为:

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{|A(i)|}{\sum_{j=1, j \in A(i)}^N (\|s_i - s_j\| - D_i)^2}} \quad (6)$$

其中: $|A(i)|$ 为节点感知邻居集节点数, D_i 为节点 s_i 与其邻居集中所有节点的距离的平均值。 δ 小则表示网络覆盖均衡性好。

综上所述,WSN 覆盖优化问题转化成覆盖率、节点利用率、能量均衡的连续目标函数组合优化问题,即有如下覆盖优化数学模型:

$$f(x_i(t)) = w_1 \mu + w_2 (1 - \varphi) + w_3 (1 - \delta) \quad (7)$$

其中: w_1, w_2, w_3 为函数权值, $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

在此提出共轭梯度法改进 AGSO 对式 (7) 求解最优。

2 基于改进人工萤火虫算法的无线传感器网络覆盖优化

2.1 改进人工萤火虫算法

在基本人工萤火虫算法中,每只萤火虫分布在目标函数的

解空间中,各自携带萤光素,拥有各自的视野范围,即区域决策域 (local-decision range)。越亮的萤火虫所在的位置越好,即有较优的目标函数适应度值。萤火虫在区域决策域内找寻邻居集合,越亮的萤火虫越能吸引周围的萤火虫向其移动。区域决策域的大小受邻居数目的影响,当邻居密度较低时,萤火虫的决策域半径会加大以便于找寻更多的邻居;反之,则减小。最终,大部分的萤火虫将会聚集在较优点处。

设 t 时刻, N 只萤火虫的组成的群体 $P = \{x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_N(t)\}$ 被随机分布在维数为 n 的目标函数 $f(x)$ 的解空间 $S = \{x \mid x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T\} \subseteq R^n$ 中,初始决策域为 r_d ,萤光素为 l_0 。设 t 时刻第 i 只萤火虫的萤光素为 $l_i(t)$,则萤光素的更新公式为:

$$l_i(t) = (1 - \rho) l_i(t-1) + \gamma f(x_i(t)) \quad (8)$$

其中: γ 为萤光素更新率, ρ 为萤光素挥发因子。

第 i 只萤火虫 t 时刻向其邻居集合中第 j 只萤火虫运动的概率为:

$$p_{ij} = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t) - l_i(t)} \quad (9)$$

其中: $N_i(t)$ 表示第 i 只萤火虫 t 时刻的邻居数目。

p_{ij} 根据轮盘法选择移动方向,则 $x_i(t+1)$ 计算公式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + s \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{x_j(t) - x_i(t)} \right) \quad (10)$$

其中: s 表示移动步长。萤火虫根据决策域内的萤火虫数目的大小对其决策域 $r_d^i(t)$ 进行调整,调整公式为:

$$r_d^i(t+1) = \min\{r_s, r_d^i(t) + \beta [N_i - |N_i(t)|]\} \quad (11)$$

其中: N_i 为决策域内萤火虫数目阈值, β 为决策域变化率。

基本 AGSO 算法存在着搜索速度偏慢,容易陷于局部最优的缺点,为了提高 AGSO 算法的全局收敛性,采用共轭梯度法提高搜索精度,共轭梯度法是用目标函数的梯度构造一组共轭方向并将其作为搜索方向的方法,该方法经有限次迭代必达极小点,其步骤为:

(1) 给定初始点 $x_i(0) \in R^n$,梯度信息 $r_i(0) = -\nabla f(x_i(0))$,迭代次数 $k=0$ 、精度参数 $\epsilon > 0$;

(2) 若达到设定迭代次数或者 $\nabla f(x_i(k)) < \epsilon$ 则停止,输出 $x_i(k)$,否则转 (3);

(3) 若 $k=0$,则令 $r_i(k) = -\nabla f(x_i(k))$,否则令 $r_i(k) = -\nabla f(x_i(k)) + \beta^k r_i(k-1)$,其中: β^k 是共轭因子,其值根据 Fletcher-Reeves 公式来确定为:

$$\beta^k = \frac{\|\nabla f(x_i(k))\|^2}{\|\nabla f(x_i(k-1))\|^2}$$

(4) 根据强 Wolfe 原则确定步长 $a_i(k)$,令 $x_i(k+1) = x_i(k) + a_i(k) r_i(k)$;

(5) $k = k+1$,转 (2)。

改进的基于共轭梯度的 AGSO 算法在第 t 次迭代后得到了一组较优的萤火虫位置 $x_i(t)$,此时不让 $x_i(t)$ 直接进行下一次迭代,而是把 $x_i(t)$ 处的梯度 $r_i(t)$ 与共轭因子 β 相乘后加上该点的负梯度 $-\nabla f(x_i(t))$ 值,构造出一组共轭方向,并沿着这组共轭方向进行搜索,在设定的迭代次数内使得萤火虫位置 $x_i(t)$ 充分下降,获得新的萤火虫位置后,再进入下一次的迭代。

共轭梯度法结合 AGSO 算法增强了算法的全局寻优能力

和局部搜索能力，改善了基本 AGSO 算法收敛速度慢、收敛精度不高的缺陷。

2.2 基于 CAGSO 的 WSN 覆盖优化步骤

(1) 初始化相关参数和系数、最大迭代次数等，在待测区域随机产生 N 个萤火虫，每个传感器节点看成一个萤火虫，每个萤火虫位置为 $x_i(t)$ ，根据 (7) 式计算对应的 $f(x_i(t))$ 并在公告板上记录最优位置 X^* 和最优值 $f(X^*)$ ；

(2) 对所有萤火虫按式 (8) 更新传感器节点荧光素值；

(3) 计算每只萤火虫的邻居萤火虫集合；用轮盘赌方式选择移动方向的萤火虫，并用式 (10)、(11) 分别更新位置和决策域半径；

(4) 计算当代所有萤火虫个体的 $f(x_i(t))$ ，若群体最优位置和最值优于公告板信息，则更新公告板，否则不更新；

(5) 判断是否迭代次数已达到 3 次，且最优值的连续变化量小于 $1e-3$ ，如是，转 (6)，否则转 (7)；

(6) 将公告板中最佳萤火虫替换最差萤火虫形成新的萤火虫群，对新的萤火虫群按共轭梯度法进行局部寻优，并记录群体最优位置和最值，若优于公告板上的最值，则更新公告板信息，否则不更新；

(7) 一次迭代完成，判断是否达到精度或最大迭代次数，若是，则退出迭代，输出全局最优解 X^* ，即最优 WSN 覆盖方案；否则，执行步骤 (3)，进入下一次迭代。

3 仿真对比

3.1 CAGSO 性能分析

选取 3 个测试函数如下，并与基本 AGSO 算法进行比较。这些函数的全局最优值均为 0。

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{i}{2}\right)x_i \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{i}{2}\right)x_i \right]^4$$

$x_i \in [-5.12, 5.12], n = 5$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10$$

$x_i \in [-5.12, 5.12], n = 3$

$$f_3(x) = 0.5 + \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1.0 + 0.001 \times (x_1^2 + x_2^2)]^2}$$

$x_i \in [-10, 10]$

表 1 20 次实验对比

函数	算法	平均最优解	收敛所需的平均迭代次数	收敛率
f1	AGSO	2.86926302E+00	99.85	19/20
	CAGSO	1.22336084E-24	70.54	20/20
f2	AGSO	4.04144459E+00	100.01	10/20
	CAGSO	1.37516880E-10	61.84	20/20
f3	AGSO	9.33474538E-03	290.68	9/20
	CAGSO	5.5576960E-05	193.46	20/20

萤火虫个数 $n = 100$ ， $\rho = 0.4$ 、 $\gamma = 0.6$ 、 $\beta = 0.08$ 、 $s = 0.03$ 、 $n_i = 5$ 、 $n_r = 5$ ，对 3 个测试函数，设置萤火虫的初始 r_d 和 r_s 相同，分别为 10，5.12，5.12，100，每个函数独立运行 20 次；对 3 个测试函数，最大迭代次数分别为 300，150，

100。从表 1 可以看出，CAGSO 算法收敛所需的平均迭代次数都要比 AGSO 少，收敛次数 CAGSO 比 AGSO 多，且 CAGSO 算法的求解精度比 AGSO 算法也有显著提高。

由图 1、2 给出的进化曲线图可看出，在收敛速度方面，本文算法均优于基本 AGSO 算法。

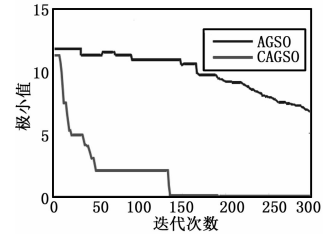


图 1 f_1 函数进化曲线

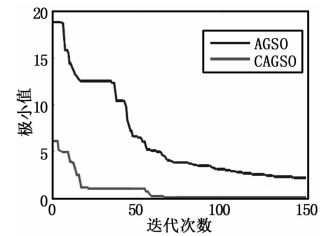


图 2 f_2 函数进化曲线

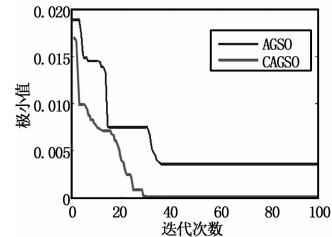


图 3 f_3 函数进化曲线

从结果可知，CAGSO 的收敛速度均要优于基本 AGSO，具有更高的学习精度。

3.2 WSN 实例仿真

假设无线传感器网络监测区域为 50 m × 50 m 的方形区域，传感器节点 $N = 40$ 个，感知半径 $r = 5$ m，图 4 中可看出，随机部署的节点分布太过集中，有较多重叠区域，个别区域则未被节点覆盖而出现盲区；在此用改进的 CAGSO 算法对节点进行分布优化，图 5 为算法运行 300 代后节点的优化分布图，由图可看出：优化后的网络覆盖率可以达到 94.11%。

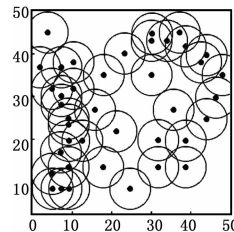


图 4 节点初始分布图

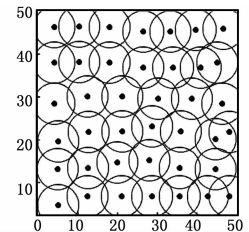


图 5 优化后分布图

在协议测试过程中，为便于观察，将各模块收或发的数据通过串口发送到计算机上，通过串口调试助手进行显示。测试时，首先利用人机界面测试软件设置的通讯。人机界面设置中间继电器 M10 的值为 16，定时器 T20 的值为 26，经编码打包后发送到 CAN 总线上，经观察，只有 PLC 主机接收到数据，实现了点对点的通讯。PLC 主机收到数据后，对 CAN 扩展帧检测 CRC 校验，然后按通信协议进行解包，取出源 ID、功能码、数据及其长度，通过串口调试助手查看，可知通讯完全正确。在测试有应答步骤的 PLC 程序传输时，利用手持编程器输入一段 PLC 代码，编码打包后向主机发送，主机正确接收后进行应答，手持编程器接收到应答帧后，确定程序下载成功，结束本次通讯。

5 结束语

本文为基于 ARM 与 FPGA 的小型 PLC 系统进行了 CAN 通讯设计，在进行通信协议制定时，充分考虑了协议的通用性、可扩展性以及可靠性和通讯效率，提出了一种适合各类数据传输的通讯格式，并针对各模块传送数据的不同，对应用层数据的组织形式进行了分别设计。另外，通过合理地对各模块通讯流程进行安排和选择适宜的通讯方式，有效提高了 PLC 主机工作效率和可靠性，降低了主机执行 PLC 程序时的扫描周期，从而提高了 PLC 主机的性能。经实验验证，本文设计的通讯协议满足了该小型 PLC 系统的通讯要求，且 PLC 系统具备了可扩展功能，以及远程调试、测控能力，实现了信息的分散采集和集中控制。

参考文献:

[1] 郭俊如. PLC 在工业控制中的地位 [J]. 内蒙古石油化工, 2004, 05: 49-50.

[2] 张 嵩, 术守喜, 丁广乾. 基于 ARM 的嵌入式 PLC 的设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2008, 03: 9-10, 23.

[3] 王 祥, 张太勤. 基于 CAN 总线的配电自动化系统研究 [J]. 广西工学院学报, 2003, 03: 37-39, 43.

[4] 罗功坤, 刘步林, 蔡启仲. 新型嵌入式 PLC 编程器的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2011, 09: 64-66, 69.

[5] 蒋玉新, 蔡启仲, 李克俭. 基于 ARM-FPGA 的 PLC 通讯与编译的设计 [J]. 微电子学与计算机, 2013, 06: 165-168.

[6] 秦 健, 李 娟, 王东兴, 吴嘉谱. 用于在线控监测的 PLC 扩展总线的设计 [J]. 微计算机信息, 2009, 28: 51-52, 28.

[7] 杨 慧, 田 亮, 田 敏. CAN 总线协议分析 [J]. 中国仪器仪表, 2002, 04: 1-4.

[8] 郝战存. 可编程控制器发展综述 [J]. 河北工业科技, 2004, 02: 53-56.

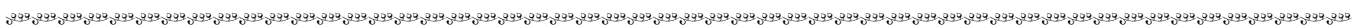
[9] 侯鸿佳, 蔡启仲, 陈文辉, 等. ARM+FPGA 组成的 PLC 结构的通信系统 [J]. 广西工学院学报, 2012, 01: 14-19.

[10] Robert Bosch GmbH. CAN Specification Version 2.0 [S]. 1991.

[11] 国家电网公司生产运营部. Q/GDW130-2004. 电力负荷管理系统数据传输规约-2004 [S]. 2004, 9.

[12] Modicon Inc. Modicon Modbus Protocol Reference Guide PI-MBUS-300. Rev. J [EB/OL]. June. 1996. /PI-MBUS-300. pdf. http://www2.schneider-electric.com.

[13] 李月恒, 项鹏, 孙德辉. Linux 系统中 CAN 总线的 Modbus 通信实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 07: 1708-1710, 1714.



(上接第 1864 页)

为了验证算法的有效性，分别采用基本 AGSO 算法和改进的 CAGSO 算法进行仿真，仿真 20 次，取网络覆盖率平均值进行比较，仿真结果如 6 所示。

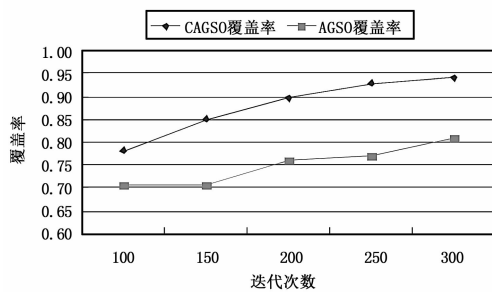


图 6 网络覆盖率比较图

表 2 策略对比图

迭代数	CAGSO 覆盖率 (%)	AGSO 覆盖率 (%)
100	78.33	70.32
150	85.14	70.66
200	89.51	75.89
250	92.97	76.99
300	94.11	80.87

如图 6 所示，CAGSO 算法能够快速、合理地给出网络覆盖优化方案。

4 结束语

本文提出了一种基于共扼梯度法改进的人工萤火虫算法 (CAGSO) 的 WSN 覆盖优化策略。共扼梯度法是利用已知点处的梯度构造一组共扼方向并沿着该方向进行搜索的方法，此方法经有限次迭代必达极小点。通过建立以覆盖率、节点利用率、能量均衡为准则的数学模型，然后用改进的 CAGSO 对该模型进行求最优解。仿真结果表明本文提出的改进算法能够加强萤火虫在空间的探索速度和能力，提高求解精度，有效应用于求解近似最优覆盖节点集，对传感器网络的优化效果更加有效。

参考文献:

[1] 叶 蓉, 赵灵锴. 基于蚁群粒子群混合的无线传感器网络定位算法 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (3): 732-735.

[2] 王方石, 须 德, 吴伟鑫. 基于自适应阈值的自动提取关键帧的聚类算法 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42 (10): 1752-1757.

[3] 曾广朴, 仲元昌, 范会联. 混合无线传感网络覆盖优化的粒子群算法 [J]. 微电子学与计算机, 2011, 28 (8): 105-107.

[4] 贾 杰, 陈 剑, 常桂然. 无线传感器网络中基于遗传算法的优化覆盖机制 [J]. 控制与决策, 2007, 22 (11): 1289-1292.