

doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2013.02.016

# 复合形遗传算法求解功率优化分配研究\*

蒋 萍<sup>1,2,\*\*</sup>, 唐天兵<sup>1</sup>

(1. 广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004; 2. 广西政法管理干部学院 信息工程系, 南宁 530023)

**摘要:**传统遗传算法存在过早收敛及局部搜索能力差的缺点,在求解无线网络协作通信功率优化分配等 NP 难问题时难以求得最优解。通过小生境策略解决遗传算法过早收敛问题,引入复合形法提高局部搜索能力,构造了兼顾广度搜索与深度搜索的高性能混合算法,并对上述问题进行求解。实验结果表明,所提算法与已有算法相比有一定优势,有效延长了协作网络寿命,稳定性较好,分配的功率波动范围小。

**关键词:**协作通信;遗传算法;功率分配;小生境策略

**中图分类号:** TN911      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-893X(2013)02-0195-05

## Optimal Power Allocation Based on Complex Genetic Algorithm

JIANG Ping<sup>1,2</sup>, TANG Tian-bing<sup>1</sup>

(1. School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Department of Information Engineering, Guangxi Administrative Cadre Institute of Politics and Law, Nanning 530023, China)

**Abstract:** The traditional genetic algorithm, which has the shortcomings of premature convergence and poor local search ability, is hard to solve the power allocation problem (NP-hard problem) of wireless network cooperative communication. This paper conquers the premature convergence by introducing niche strategy, and improves the local search capabilities by combining complex method, constructs a high-performance algorithm taking account of the breadth and depth in searching, and then solves the power allocation problem. The simulation results show that the proposed strategy is better than the existing algorithms. It is able to effectively extend network lifetime, generates more stable values, and performs a good stability.

**Key words:** cooperative communication; genetic algorithm; power allocation; niche strategy

## 1 引言

协作通信基于多用户环境获得发射分集的增益,实现通信效果的增强。针对协作通信,学者研究的方向涉及中继协作策略<sup>[1]</sup>、协作信号的设计与检测<sup>[2]</sup>、协作中继节点选择及功率最优分配<sup>[3]</sup>等方面。

协作通信功率最优分配问题是一个 NP 难问题,在考虑误码率等约束条件时其目标函数具有高度非线性特征,常规算法求解效果欠佳。如文献[4]基于中断概率提出的拉格朗日乘数法能快速求解,

但精度较低;文献[5]基于放大转发中继模式提出两种分配方案,即自适应功率分配方案和等功率分配策略方案,前者要稍优于后者,但前者从一组人为设计的初始值开始,非最优最初值形成的分配序列也并非最优。

遗传算法是一种具有很强鲁棒性的智能算法,其适合对 NP 难等问题的求解,但会过早收敛且局部搜索能力差,在求解该类问题时效果有时也不理想。本文以小生境引入复合形的思路,构造兼顾广度搜索及深度搜索的高效混合算法,最后通过仿真

\* 收稿日期:2012-06-29;修回日期:2012-09-05      Received date:2012-06-29;Revised date:2012-09-05  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102090)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China(No.61102090)

\*\* 通讯作者:j\_pingzi@163.com      **Corresponding author:** j\_pingzi@163.com

实验验证了设计算法求解协作网络功率分配问题的有效性。与已有文献相比,本文算法优于自适应最大化剩余能量与最小化分配功率分配策略,表现出较好性能。

## 2 协作通信网络寿命问题及建模

### 2.1 问题描述

功率分配是影响协作网络寿命的最重要因素,若每次能分配一个满足条件而数值较小的功率,则整个协作网络的寿命可能获得延长。协作网络中的总功率为源节点功率和被选择作为协作伙伴的中继节点对应的功率之和,各方案中对应的源节点功率均一样,因此只考虑将中继节点的功率和作为性能参数。功率分配问题表示对一组数量固定的中继节点分配一定的功率的问题,其既要使整个网络能正常工作(即能满足一定的约束条件),又要使网络的总功能最小。本文以误码率作为约束条件对功率的分配进行研究,即在满足既定误码率的条件下实现对网络分配较小的功率,为此首先对问题进行建模。

### 2.2 数学建模

设包含在协作网络中可用中继节点数为  $n$ , 功率分配的一个方案可表示为

$$p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

其中,  $p_i \in [0, e_{iu}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $e_{iu}$  表示第  $i$  个中继节点当前拥有能量的上限值。当  $p_i$  取值为 0, 表示对应中继节点没有参与该次的协同通信。对协作通信的功率分配问题建立的数学模型如下:

$$\min P(\bar{p}) = \sum_{i=1}^{m(m \leq n)} p_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_e(\bar{p}) \leq S \quad (2)$$

其中,  $\bar{p}$  表示去除 0 功率的节点后的功率集合, 以  $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  表示,  $m$  为对应数目。

式(1)同样表示一个最小化函数, 求解目标为最小化总功率, 即期望能寻找总发射功率最小的一个功率分配方案; 式(2)表示该功率分配方案对应的误码率应不大于设定的误码率门限值, 这里用  $S$  表示,  $P_e(\bar{p})$  则表示在某功率分配方案下对应的误码率, 其计算方式如下<sup>[5-6]</sup>:

$$\bar{P}_e = \frac{C(m)}{k^{m+1}} \frac{1}{\epsilon_s \Omega_{sd}} \prod_{r=1}^m \left( \frac{1}{\epsilon_s \Omega_{sr}} + \frac{1}{\epsilon_r \Omega_{rd}} \right) \quad (3)$$

其中,  $C(m)$  的计算方法为

$$C(m) = \frac{\prod_{i=1}^m (2i - 1)}{2(m + 1)!} \quad (4)$$

$\epsilon_s$  与  $\epsilon_r$  分别为源节点与第  $r$  个中继节点的发射功率; 而对于任意的两个节点  $p, q$ ,  $\Omega_{pq} = 1/d_{pq}^\nu$  表示路径损耗系数, 其中  $d_{pq}$  为节点  $p$  与节点  $q$  的距离,  $\nu$  则为路径损耗指数。

## 3 算法设计

### 3.1 复合形法

复合形法是一种直接搜索方法, 它只通过比较各设计点的目标函数和约束条件的数值来进行搜索, 基本步骤是: 首先在  $N$  维设计空间中构成顶点数  $P$  大于  $(N + 1)$  的复合形, 然后进行寻优搜索, 包括反射、延伸和搜索, 替代复合形中目标函数最大的点——最差点, 如此反复进行, 使复形逐步缩小, 逼近最优点。对于功率分配问题, 将每个中继节点所取功率作为一个维度, 所有节点的取值对应一种功率分配方案, 构成一个顶点, 此顶点的好坏则根据 2.2 节中描述的模型进行评判。

### 3.2 小生境操作

小生境技术产生于对自然界“物以类聚, 人以群分”现象的模拟, 在群体中构造不同的和特定的个体生存环境, 并对各生存环境中优秀个体实施保护措施, 使之在进化过程中不至于被迅速同化, 也就使具有不同适应度和潜力的个体得以生存, 因此能有效维持群体多样性, 从而防止群体过早收敛。

### 3.3 基于小生境的复合形混合遗传算法

根据前文构造混合算法的思想, 设计的混合遗传算法如图 1 所示。从图中可以看到, 混合遗传算法的主体分为三部分, 即遗传操作、小生境操作与复合形法。遗传操作从整体出发进行搜索, 然后针对未被小生境操作淘汰的个体执行复合形法。在算法执行结束后, 算法输出的最优个体即对应功率分配方案。

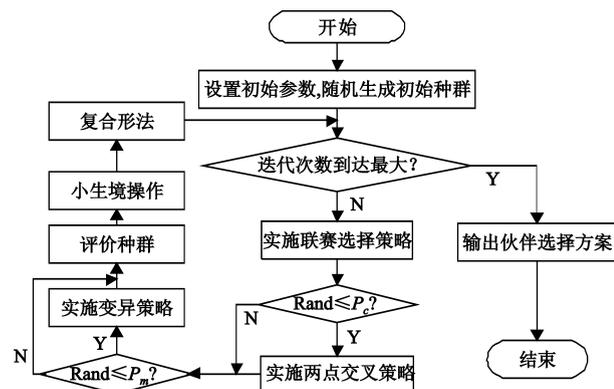


图 1 求解功率分配问题的小生境复合形遗传算法

Fig. 1 Niching complex genetic algorithm for solving power allocation problem

为实现对协作网络功率优化问题的求解,算法实现如下所述。

(1) 编码

采用浮点数编码,即其每一个基因位上的取值为一个浮点数,且表示的意义为分配给与基因位标号一致的中继节点的工作功率,各基因取值时最大不超过各中继节点拥有的能量。

(2) 个体

对功率分配问题,其对应个体为由一系列实数组成的数组,表示为  $(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ ,  $p_i$  表示第  $i$  个中继节点对应功率值,其中  $n$  表示协作网络中需分配功率的中继节点的数量。

(3) 种群及其初始化

功率分配对应种群也可形式化表示为  $(ch_1, ch_2, ch_3, \dots, ch_m)$ ,其中  $ch_i (i = 1, 2, 3, \dots)$  表示各个个体,而  $m$  表示种群的规模大小;而在当进行种群的初始化时,需根据各中继节点当前拥有的能量来产生在该数值范围内的随机数组成初始种群。

(4) 评价函数

对功率分配问题,其评价函数在满足误码率约束条件的下协作伙伴的功率和达到最小,因此建立的评价函数如式(5)所示的评价函数为

$$f(c) = \begin{cases} 1/P(p), & \text{if } P_e(p) \leq S \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $p$  表示一个功率分配方案,最后输出得分最高的方案为问题求解结果。若某一选择方案违反相应约束时,返回的函数值为 0,代表算法对该方案进行了舍弃。

(5) 选择操作

采用联赛选择策略实现选择算子,即每次随机选择一定数量的个体并进行逐一比较,最后将最好的个体则加到新种群中。重复多次,直至新种群达到设计规模大小。在选择操作结束时实施精英保存策略,将上一代最优秀个体替换掉新种群中最差的个体。

(6) 交叉操作

对浮点数编码的个体,本文选择算术交叉完成对个体基因的重组。

(7) 变异操作

变异策略为大概率启发式逼近策略,具体实施方法为:首先随机选择若干需要进行变异的基因,然后计算误码率上限对比于当前方案对应误码率的倍数,然后将该倍数的某百分比值作几何划分给需要变异的各位基因,如设当前需要变异的基因数为  $k$ ,且计算得的倍数为  $\omega$ ,设定变异的百分比为  $\beta$ ,则几何划分给各个基因的倍数为  $1/\sqrt[k]{\omega\beta}$ ,以该倍数与原基因值相乘结果作为新的基因值。在本文计算过程中上述  $\beta$  取 0.9。

(8) 小生境操作

对进行遗传操作后的种群,分别两两计算各个个体间的欧氏距离<sup>[6]</sup>,当归一化的欧氏距离(如式(6))小于设定值  $D$  时则对较差个体的适应度值设为 0,以将其清除。最后未被清除的个体作为小生境中心成员,所有与中心成员距离小于  $D$  的,重新构成一小种群,最后对这些小种群分别执行复合形法,实现对个体适应度值的提升。下式为归一化欧氏距离的计算方法,其中  $N$  表示遗传算法种群设计的规模, $n$  为求解变量个数,本文中对应中继节点的数量。

$$\|X_i - X_j\| = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad i = 2, 3, 4, \dots, N; j = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (6)$$

(9) 复合形法

此法针对每个小生境进行,其操作过程如下:

- 1) 找出小生境内的最差点及最优点,设为  $X_w$  及  $X_b$ ;
- 2) 计算除最差点外所有点对应的中心,设为  $X_c$ ;
- 3) 以中心  $X_c$  为映射中心,按式(7)计算坏点  $X_w$  的映射点  $X_r$ :

$$X_r = X_c + a(X_c - X_w) \quad (7)$$

式中,  $a$  为映射系数,通常取值大于 1;

- 4) 比较  $X_r$  与  $X_w$ ,若  $X_r$  优于  $X_w$ ,则以  $X_r$  替换  $X_w$ ,否则令  $a = 0.5a$ ,重新计算式(7),直至替换成功;

- 5) 为平衡遗传算法及复合形的搜索性能,上述替换一旦成功或映射次数达设定次数时,则结束当前复合形操作,而继续图 2 所示迭代过程。

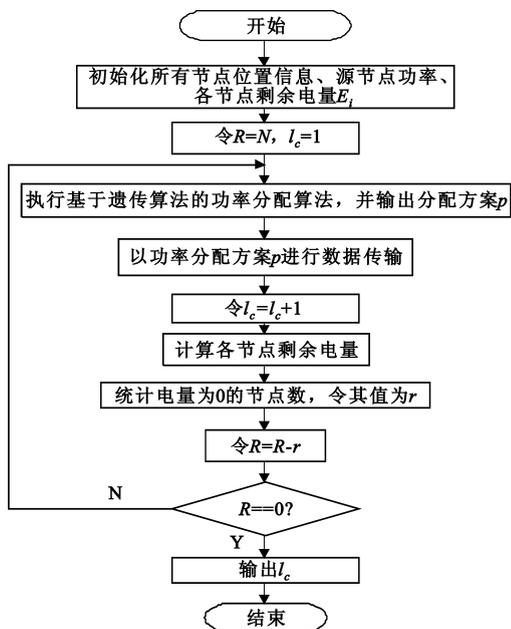


图 2 能量受限基于遗传算法的功率分配算法  
Fig.2 Power allocation based on genetic algorithm with energy limited

## 4 实验与结果分析

### 4.1 实验环境

本文实现算法的编程语言为 matlab, 实验环境为: Intel E5400 2.70 GHz Pentium(R) 双核 CPU, 含 2MB 二级 cache; 2G DDR3 内存; WindowsXP SP3 的操作系统。对各控制参数进行如下设置: 算法迭代 500 次, 种群规模 100, 交叉概率 0.85, 变异概率 0.50, 小生境容量为 1, 复合形映射次数为 5。

### 4.2 结果分析

实验场景设计如下:

(1) 源目节点距离归一化为 1, 而所有中继节点则随机分布在边长为 1 的正方形内;

(2) 场景中源节点与中继节点的发射功率设在区间 [5, 10] 取的随机数;

(3) 误码率约束上限  $S$  取值为  $10^{-5}$ , 目的节点的实际误码率根据公式 (3) 与选择的中继节点具体状况进行计算, 计算时路径损耗指数  $\nu$  取 2, 并且采用 BPSK 方式进行调制, 因此公式中系数  $k$  为 2;

(4) 对源节点功率, 在第一部分实验分别取 6 dB、8 dB 与 10 dB 3 个值, 第二部分实验则分别在 [0, 20] 区间内进行采样;

(5) 噪声量化为 1, 即各节点工作功率与信噪比在数值上相等; 协作网络中各中继节点具有 100 倍于源节点功率的电量。在进行实验时, 文献 [7] 设计了两种算法, 分别为自适应最大化剩余能量算法 (Adaptive Power Maximal Residual Energy, APMRE) 与最小化分配功率算法 (Minimum Power Allocation, MPA), 本文与这两种算法的比较结果如图 3 所示。与此同时, 该文献还以 MPA 算法考察了不同源功率时固定 14 个中继节点对应协作网络的功耗情况, 本文算法与之进行比较结果如图 4 所示。在下述图中, HGA 代表本文基于小生境复合形遗传算法取得的结果。

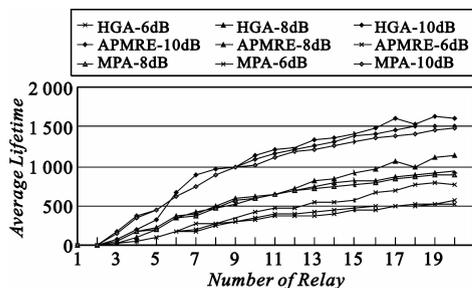


图3 本文算法延长网络寿命效果比较

Fig.3 Life time comparison based on proposed algorithm

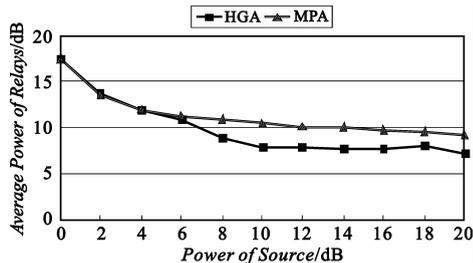


图4 中继网络平均功率比较

Fig.4 Average power comparison of relay network

在图 3 中, 有 3 组不同浓度的曲线, 分别为深色、灰色与浅色, 其中浅色曲线与灰色曲线分别为文献 [7] 中 MPA 与 APMRE 算法对应结果, 深色曲线为本文算法实验对应结果。

从图 3 可知, 与文献结果, 本文算法在延长协作网络使用寿命方面更具有有效性, 在相同源功率时几乎均能取得更长的网络工作时长, 存在少数部分情况效果变差或者波动在、稳定性欠佳的情况, 这是由于遗传算法是一种随机性搜索算法原故, 即使对于相同的场景与模拟参数, 求解的结果仍有可能不完全相同。总体上本文方法仍然具有一定的优势。

而从图 4 可知, 两种算法均有中继网络消耗功率随源功率增大而减小的趋势, 而本文中基于遗传算法的策略则具有更好的性能, 取得了更小的功率消耗, 最好情况约节省 25%。

## 5 结束语

本文针对能量上限的协作网络功率优化分配问题, 提出了一种基于混合遗传算法的功率分配算法。与已有算法相比, 本文算法能有效地延长协作网络寿命, 每次分配的功率较小且仅在小范围内波动, 有较好的稳定性, 是一种有效的协作网络功率优化分配算法。这为解决协作通信功率分配提供了新思路。

### 参考文献:

- [1] 季薇. 无线通信中的若干关键问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [2] Ji Wei. Research on Key Techniques of Wireless Cooperative Communication [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [3] Li R K, Bai Z Q, Kwak K. Space frequency codes based amplify and forward cooperative system [C] // Proceedings of 9th International Symposium on Communications and Information Technology. Lcheon: IEEE, 2009: 1185 - 1188.
- [3] 张国鹏, 顾洁, 刘鹏, 等. 无线传感器网络中基于博弈论的协作通信策略 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(19):

133 – 136.

ZHANG Guo-peng, GU Jie, LIU Peng, et al. Cooperative Communication Strategy for Wireless Sensor Networks Based on Cooperative Game Theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(19):133 – 136. (in Chinese)

- [4] 唐伦,王欢,陈前斌,等. 认知 OFDM 网络中基于中断概率约束的功率分配[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(1):120 – 123.

TANG Lun, WANG Huan, CHEN Qian-bin, et al. Power Allocation for Cognitive OFDM Radio Networks under Primary User's Outage Probability Constraint[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(1):120 – 123. (in Chinese)

- [5] Maham B, Hjørungnes A. Minimum Power Allocation in SER Constrained Amplify-and-Forward Cooperation[C]//Proceedings of 2008 67th IEEE Vehicular Technology Conference. Calgary, Canada: IEEE, 2008:2431 – 2435.

- [6] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.

ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Principle and Application of Genetic Algorithm[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)

- [7] Maham B, Hjørungnes A, Debbah M. Power allocations in minimum-energy SER-constrained cooperative networks[J]. Annals of Telecommunications, 2009, 64(7):545 – 555.

### 作者简介:



蒋萍(1981—),女,广西资源人,现为讲师、硕士研究生,主要研究方向为并行分布式计算和优化算法;

JIANG Ping was born in Ziyuan, Guangxi Zhuang Autonomous Region, in 1981. She is now a lecturer and also a graduate student. Her research concerns parallel distributed computing and opti-

mization algorithm.

Email: j\_pingzi@163.com

唐天兵(1972—),男,四川成都人,1997年于广西大学获控制理论与控制工程专业硕士学位,现为副教授、硕士生导师,主要研究方向为并行分布式计算和计算智能。

TANG Tian-bing was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1972. He received the M. S. degree from Guangxi University in 1997. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns parallel distributed computing and computational intelligence.