

# 改进遗传算法在 E 面波导滤波器设计中的应用

尹 雷, 洪 伟

(东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

**摘 要:** 由于遗传算法表现出良好的全局搜索性能, 因此本文将其应用于高性能 E 面波导滤波器的设计中. 针对传统遗传算法所存在的局部搜索能力差的缺点, 本文在并行遗传算法的基础上, 通过将原有群体划分为多个子群体, 利用多个子群进行局部极值点的搜索, 并利用群间迁徙, 使改进后的算法收敛速度平均提高了 2~3 倍. 数值实验表明算法具有较快的收敛速度和较好的全局搜索性能, 证明了算法的有效性.

**关键词:** 遗传算法; 波导滤波器

**中图分类号:** TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0121-04

## An Improved Genetic Algorithm and Its Application in E-Plane Waveguide Filter Design

YIN Lei, HONG Wei

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, an improved Genetic Algorithm (GA) was applied to the design of high performance E-plane waveguide filters at the first time. For dealing with the shortcoming of GA as low efficiency in local optimum searching, the idea based on Parallel Genetic Algorithm (PGA) known as separate local optimization was presented. By separating the whole population into sub-populations, and adding a new operator known as crossover between two sub-population, the new method can provide as 2~3 times quickly as traditional GA. All numerical examinations illustrated the high convergence speed and good global searching of the new algorithm, and proved the validity of it.

**Key words:** genetic algorithm; waveguide filter

### 1 引言

E 面波导滤波器于 1974 年由 Konish 首先提出<sup>[1]</sup>, 由于它具有结构简单, 带内插损小等一系列优点, 因此一直受到重视并被广泛地研究<sup>[2~4]</sup>. 随着对滤波器性能的要求不断提高, 如何设计高性能的 E 面波导滤波器成为众所关心的焦点.

通常的设计方法包括综合法和优化设计方法. 综合法可以快速得到结果<sup>[1]</sup>, 但是存在着精度较低的缺点, 同时, 不是任意的结构都可以给出与之相对应的等效电路模型. 在文献[2~4]中, 优化设计方法已经成功应用于 E 面滤波器设计. 但是这一类算法往往只适用于解空间呈单峰分布或紧致分布的问题, 对于解空间呈多峰分布的问题, 往往会收敛到局部最优解. 而这个问题对于高性能滤波器, 如相对带宽仅为 0.15~0.2% 的窄带滤波器或相对带宽为 10~25% 的宽带滤波器的设计显得更为突出.

遗传算法的提出在很大程度上解决了上述方法所存在的问题<sup>[5,6]</sup>. 遗传算法是一种随机化优化方法, 由于它同时处理群体中多个个体, 即同时对搜索空间中的多个解进行评估, 所以它具有较好的全局搜索性能. 同时遗传算法的适应度(目标)函数不仅不受连续可微的约束, 甚至不要求其连续, 而且

其定义域可以任意设定, 因此极大地扩展了遗传算法的应用范围. 但是, 基本遗传算法存在着局部搜索性能较差的缺陷, 对于某些分布变化缓慢的问题, 常常需要进行大量的计算. 为了解决这一缺陷, 通常采用混合遗传算法. 本文则从遗传算法自身着手, 在遗传算法并行运算的基础上, 通过引入群间交叉的思想, 将遗传算法分解为在多个子群间进行, 并通过子群间交叉来增加基因模式数, 避免未成熟收敛. 数值实验表明, 在相同的群体规模下, 本方法的收敛速度较普通遗传算法提高了 2~3 倍.

### 2 理论分析

#### 2.1 算法描述

De Jong 在他的文章中已经指出<sup>[5]</sup>, 较大的群体规模可以提供较好的全局搜索性能, 但收敛相对较慢. 同时, 当群体规模过大时, 会因为在选择时往往会淘汰掉大多数个体而影响基因配对库的形成, 从而影响交叉操作. 而小规模群体则相反, 由于规模小, 其搜索空间的分布范围有限, 因此可以较快的达到局部最优解, 但是容易引起未成熟收敛. 为此, 通常在遗传算法的基础上, 利用其他可以提供快速局部搜索性能的算法, 如爬山法和列表寻优法, 来进行快速的局部搜索, 从而

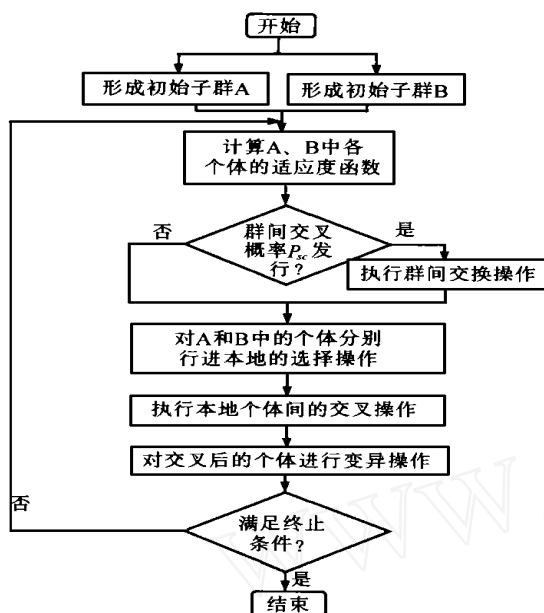


图1 改进遗传算法的迭代步骤

构成混合遗传算法.事实上,从生物进化的角度出发可以发现,若干个相互竞争的子群体,比将所有个体都聚集在一起的大群体具有更高的搜索效率.另一方面,在遗传算法的并行化的过程中,通常将群体分为多个子群体,每个子群体分配一个处理器,让它们互相独立地执行并行进化,每经过一定的间隔(即若干代进化),就把它们的最佳个体迁移到相邻的子群体中,这就是所谓的孤岛(islands)模型.因此,从孤岛模型出发,将这种并行机制引入到普通遗传算法中,同时模拟真实的进化过程,将定期的迁徙过改为由群间交叉概率( $P_{sc}$ )控制.图1给出了当分为两个子群时的迭代步骤.其中群间交换定义如下:

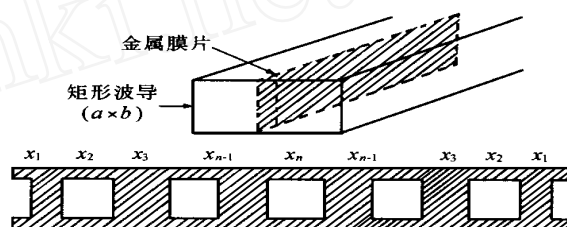


图2 E面滤波器典型结构

表1 普通遗传算法和改进遗传算法对典型问题的优化结果比较  
(交叉概率  $P_c = 0.90$ , 变异概率  $P_m = 0.001$ , 编码长度无为16位, 相同的随机数发生器种子)

函数	真实解	入口规模	生成代数	最优解	适应度函数值
$f_1 = \sum_{i=1}^5 x_i^2$ $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$	$f_1 = 0.0$ $x_i = 0.0$	50	141	$-5.4 \times 10^{-4}, 5.4 \times 10^{-4}, -4.1 \times 10^{-3},$ $-2.0 \times 10^{-2}, 2.0 \times 10^{-2}$	0.0
			83	$-3.9 \times 10^{-4}, 3.9 \times 10^{-4}, -8.6 \times 10^{-4},$ $-5.0 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3}$	0.0
		100	100	$3.5 \times 10^{-3}, -5.7 \times 10^{-3}, 1.5 \times 10^{-2},$ $-7.1 \times 10^{-3}, 5.4 \times 10^{-4}$	0.0
			60	$4.5 \times 10^{-3}, -1.1 \times 10^{-2}, -8.0 \times 10^{-3},$ $-1.3 \times 10^{-2}, 5.4 \times 10^{-4}$	0.0
$f_2 = 100(x_1^2 - x_2) + \sum_{i=1}^2 (1 - x_i)^2$ $-2.048 \leq x_i \leq 2.048$	$f_2 = 0.0$ $x_i = 1.0$	50	159	(1.02405, 1.05261)	0.0
			22	(0.986234, 0.971171)	0.0
		100	40	(0.998234, 0.997671)	0.0
			37	(0.998234, 0.998484)	0.0
$f_3 = \sum_{i=1}^5 \text{int}(x_i)$ $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$	$f_3 = 25$ $[x_i] = 5$	50	102	(5.006, 5.109, 5.112, 5.082, 5.116)	25
			47	(5.078, 5.108, 5.017, 5.071, 5.000)	25
		100	67	(5.081, 5.051, 5.112, 5.082, 5.116)	25
			27	(5.031, 5.12, 5.024, 5.001, 5.029)	25

(表中: 代表普通遗传算法, 代表改进遗传算法)

以交换率  $P_e$ , 从子群 A 中随机抽取  $M$  个个体, 并和子群 B 中同样随机选取的  $M$  个个体进行交换, 交换后形成的两个新的子群再分别进行本地的遗传操作. 对于子群数目大于 2 的情况, 则子群 A 和 B 亦是在所有子群中随机选取.

通过这一改进, 实际产生了两个效果: 1. 在相同的总的个体数目下, 由于采用小群体进行迭代, 使局部的搜索性能得到提高; 2. 群间交叉的引入, 实际上是通过相互孤立的群体间的模式的重组, 增加了相应的模式数, 从而避免未成熟收敛的发生. 表 1 给出了 3 个典型极值问题在相同的优化策略下, 由普通遗传算法和改进遗传算法分别在人口规模在 50 和 100 的情况下的优化结果: 由表 1 可见, 和普通遗传算法相比, 改

进方法具有较快的收敛速度, 且没有相应牺牲其全局搜索能力.

## 2.2 在 E 面波导滤波器中的应用

图 2 给出了典型的 E 面滤波器结构. 利用变分法<sup>[1]</sup>或模式匹配法<sup>[2~4]</sup>可以得到滤波器的特性是  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  的函数:

$$L_s = f_s(w, X) \quad (1)$$

$$L_r = f_r(w, X)$$

其中:  $L_s$  和  $L_r$  分别为滤波器的插入衰减和回波损耗.  $x_i (i = 1, 3, \dots)$  分别为各级条带长度,  $x_i (i = 2, 4, \dots)$  分别为各级谐振腔长度,  $w$  为频率采样点. 在一般优化方法中, 通常采用取极

小值的方法,这时常用的目标函数可以表示为<sup>[3,4]</sup>:

$$F = \sum_{i=1}^M \left( \frac{f_s(w_i, X)}{L_1} \right)^2 + \sum_{j=1}^N \left( \frac{f_s(w_j, X)}{L_2} \right)^2 \quad (2)$$

其中:  $M$  和  $N$  分别为通带和阻带内的频率采样点数,  $L_1$  和  $L_2$  分别为通常带内最大插入损耗和阻带内最小衰减. 由于遗传算法是求解函数的最大值, 这时如果将函数  $F$  的倒数作为遗传算法的适应度函数, 则一方面倒数会破坏函数的原有特性, 另一方面, 从数值逼近的角度去看, 上述函数实际上是一种最小二乘逼近, 因此会出现在整体逼近要求, 但在个别地方存在较大的误差, 从而影响滤波器的整体性能. 为此, 从最佳一致逼近出发, 将目标函数(即遗传算法中的适应度函数)修改为下列形式:

$$F = \sum_{i=1}^M \left[ \frac{L_1}{|f_s(w_i, X) - L_1| + 0.001} \right] + \sum_{j=1}^N \left[ \frac{L_2}{|f_s(w_j, X) - L_2| + 0.001} \right] \quad (3)$$

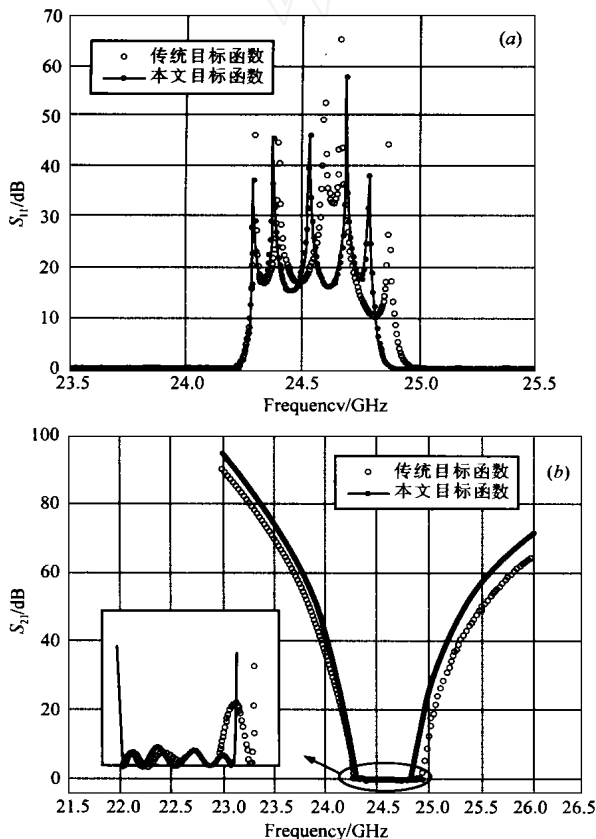


图3 传统目标函数和本文目标函数优化结果比较

其中:  $M$ ,  $N$ ,  $L_1$  和  $L_2$  的定义同上, 分母中 0.001 的出现是为了避免产生除零错误. 图 3 给出了在相同优化策略下, 给定交叉概率  $P_c = 0.9$  和变异概率  $P_m = 0.001$  时, 分别由方程 (2) 和 (3) 作为适应度函数时的优化结果. 从图中可以发现, 在带外特性基本相同的情况下, 由方程 (3) 得到的带内性能明显好于由方程 (2) 给出的结果. 由于由方程 (2) 得到的结果在通带边缘有一个较大的波动, 因此在滤波器的特性中 (如图 3(b) 所示) 表现出带宽略宽. 在实际应用中, 除了上面给出的交叉概

率和变异概率外, 子群间的发生交换的概率和交换率通常选取为 0.1 和 0.01 左右.

### 3 数值结果

利用上述改进遗传算法, 设计了不同波段的三个滤波器并和传统的算法进行了比较. 表 2 给出了相应的设计指标和比较结果. 在下面的设计中, 群体规模均为 100, 交叉概率  $P_c = 0.9$ , 变异概率  $P_m = 0.001$ . 对于改进算法而言, 子群数目均为 2, 群间交换概率  $P_{sc} = 0.1$ , 群间交换率  $P_e = 0.01$ . 所有计算均进化了 200 代. 计算时所有算法的初值都是在给定的范围内随机产生. 在表格中目标函数值越大, 解越逼近最优解. 表格中的数据表明改进遗传算法能够被很好地应用于高性能的 E 面波导滤波器的设计. 利用改进的遗传算法, 我们还设计制作了 Ku 波段两只窄带滤波器, 设计中心频率分别为 14.823 GHz 和 15.243 GHz, 带宽均为 28 MHz, 其相对带宽仅为 0.184%. 图 4 给出了设计结果和实验结果比较.

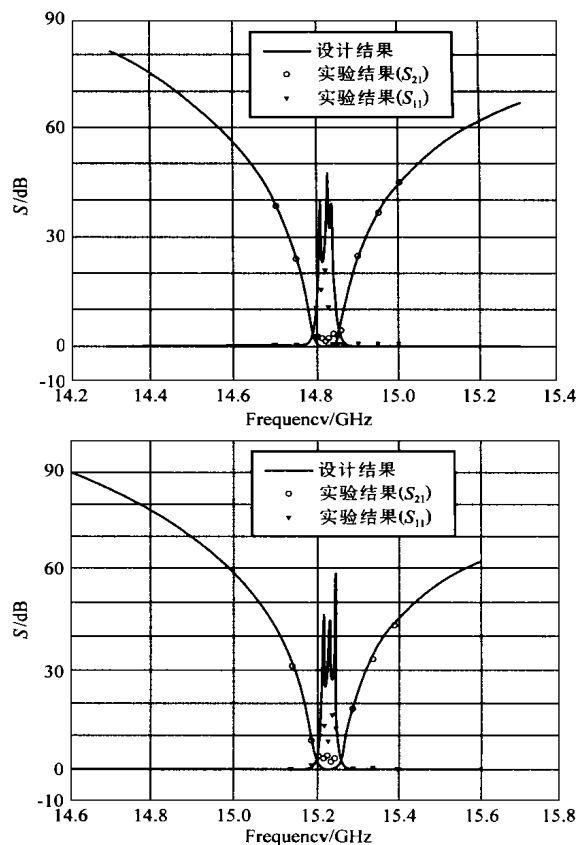


图4 Ka 波段窄带滤波器设计结果和实验结果比较

从图中可以看出, 设计结果和实验结果基本吻合, 证明了该方法的有效性. 由于金属条带过长, 受加工条件限制, 必须将其分割成两部分加工. 这造成了金属膜片上电流的不连续性, 从而造成通带内插入损耗较大.

### 4 结论

针对传统遗传算法局部收敛速度慢的缺点, 本文从实际

的生物进化环境和并行遗传算法中的孤岛模型出发,将普通的遗传算法划分为多个子群同时进行遗传操作,而子群间则通过群间的个体交换了相互传递遗传信息.通过这一改进,使

算法平均收敛速度较传统遗传算法提高了 2~3 倍.数值结果表明算法在保证了全局搜索性能的同时,具有较快的收敛速度,证明了算法的有效性.

表 2 改进遗传算法和普通遗传算法设计结果比较

波导尺寸 (mm)	谐振腔 数目	膜片厚度 (mm)	最终适应度 函数值	$\bar{x}$ (mm)	中心频率 (GHz)	3dB 带宽 (MHz)	插入损耗 (dB)
$a = 15.799$ $b = 7.899$	6	0.5	6.11526	(2.539, 7.313, 8.869, 7.267, 10.386, 7.267, 10.631)	16.53	533	$4.460 \times 10^{-2}$
			4.00180	(2.503, 7.307, 8.776, 7.268, 10.364, 7.295, 10.671)	16.52	529	$1.880 \times 10^{-1}$
				(3.269, 7.196, 9.317, 7.228, 10.451, 7.239, 10.022)	16.52	539	2.643
$a = 7.112$ $b = 3.556$	8	0.1	5.03264	(0.037, 4.173, 0.222, 4.465, 0.486, 4.548, 0.606, 4.566, 0.635)	32.09	7936	$1.822 \times 10^{-1}$
			1.86537	(0.026, 3.989, 0.158, 4.394, 0.476, 4.531, 0.559, 4.547, 0.577)	32.09	7936	$1.822 \times 10^{-1}$
				(0.124, 4.213, 0.469, 4.486, 0.562, 4.619, 0.598, 4.683, 0.539)	95.05	1420	$4.778 \times 10^{-2}$
$a = 2.54$ $b = 1.27$	4	0.05	5.24837	(0.614, 1.387, 1.787, 1.388, 1.968)	95.05	1420	$4.778 \times 10^{-2}$
			4.91762	(0.625, 1.398, 1.831, 1.390, 2.018)	95.05	1290	$7.441 \times 10^{-1}$
				(0.673, 1.389, 1.890, 1.388, 1.956)	95.05	1423	0.531

(其中: 代表改进遗传算法, 代表普通遗传算法, 代表 Powell 算法)

## 参考文献

- [1] Y. Konishi and K. Uenakda. The design of a bandpass filter with inductive strip-planar circuit mounted in waveguide. IEEE Trans. 1974, MTT-22(10):869~873
- [2] Yi-Chi Shih, T. Itoh and L. Q. Bui. Computer-aided design of millimeter-wave E-plane filters. IEEE Trans. 1983, MTT-31(2):135~140
- [3] 陈亿元, 尹雷, 朱晓维, 洪伟. 一种通用的 E 面波导滤波器数值分析方法及其 CAD 软件包. 电子学报, 1997, 12:45~49
- [4] R. Vahldieck, J. Bornemann, F. Arndt and D. Frauerholz. Optimized waveguide E-plane metal insertion filters for millimeter-wave applications. IEEE Trans. ,1983, MTT-31(1):65~69
- [5] K. A. De Jong. An Analysis of the Behaviour of a Class of Genetic Adaptive Systems:ph. D Dissertation. University of Michigan, 1975
- [6] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 王东生. 遗传算法及其应用. 人民邮电出版社, 1996



尹 雷 1973 年出生. 1997 年于东南大学获硕士学位. 现于东南大学毫米波国家重点实验室攻读博士学位. 主要研究方向为计算电磁学及其数值方法.

洪 伟 1962 年出生. 1988 年于东南大学获博士学位. 现为东南大学无线电工程系教授、博士生导师、副主任. 在国内外学术刊物上发表论文 170 多篇, 出版学术专著一部. 获一项国家自然科学基金四等奖、两项国家教委科技进步一等奖. 获国家人事部“突出贡献中青年专家”等多项荣誉称号. 获“国家杰出青年基金”和国家教委“跨世纪优秀人才基金”等. 任多种国内外权威刊物, 如 IEEE Trans. on MTT, IEEE Trans. on AP, IEEE Trans. on CPMT, IEEE Proc.-H, Electron. Lett., 《电子学报》, 《微波学报》, 《电波科学学报》等的审稿人或编委.