

# 基于隐式空间蛙跳算法设计的双频滤波器

张友俊,王连栋

(上海海事大学 信息工程学院,上海 201306)

**摘要:**考虑到传统的隐式空间映射算法(ISM)在参数提取中会出现收敛速度慢甚至假收敛的情况,将改进的蛙跳算法用于隐式空间映射的参数提取,可有效改善参数提取过程中算法的不收敛性。通过改进参数提取中精确和粗糙模型的映射关系,可以明显减少迭代次数,并用于优化设计一个可工作在无线局域网(WLAN)的微带双频带滤波器。滤波器的中心频率分别为 2.45 GHz 和 5.25 GHz,滤波器经过 3 次迭代后达到设计要求,验证了算法的可行性和有效性。

**关键词:**隐式空间映射算法;参数提取;蛙跳算法;粗糙模型;双频带滤波器

**中图分类号:**TN713; TP391

**文献标识码:**A

## Design of Dual-Band Filter Based on Implicit Space Leapfrog Algorithm

ZHANG Youjun, WANG Liandong

(School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Considering that the slow convergence speed and even false convergence would appear in the conventional implicit space mapping (ISM) algorithm during the parameter extraction, an improved implicit space leapfrog algorithm is used to extract the implicit space mapping parameters, and the non convergence of the algorithm during the parameter extraction can be improved effectively. By improving the mapping relationship between the accurate model and the coarse model, the iteration numbers can be reduced significantly and be used to optimize the design of the micro-strip dual frequency band filter operating at WLAN. The center frequencies of the proposed filter are 2.45 GHz and 5.25 GHz respectively. The design requirements have been met after three iterations, thus the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm has been verified.

**Key words:** implicit space mapping algorithm; parameter extraction; leapfrog algorithm; coarse model; dual-band filter

### 0 引言

通信已成为现代生活中不可或缺的重要元素,但随着通信技术的日益发展,频谱资源越来越匮乏,单一频率的滤波器越来越不适应现代通信的要求,双频滤波器甚至是多频滤波器正成为现代通信的一种趋势。微波双通带滤波器作为这些通信系统重要的前端器件,被广泛应用在双频便携式电话、无线局域网(WLAN)、全球无线接入(WiMAX)等中,其性能直接影响整个通信系统的质量,对双频带滤波器的研究具有重要意义。双频滤波器比单通带滤波器多了 1 个通带,采用传统的奇偶模分析法会加大计算的难度和复杂度,这会导致在利用电磁仿真软件(HFSS、FKEO、CST 等)仿真精细模型时耗时较

长(单一参数优化 3~4 次的时间约为 2 h)。

1994 年,John W. Bandler 提出的空间映射算法<sup>[1-2]</sup>结合了粗糙模型的快速性和精确模型的准确性,将优化过程放在粗糙模型中,而精确模型中只进行仿真验证<sup>[3-4]</sup>。由于粗糙模型耗时较短,故空间映射算法相对传统的滤波器设计耗时明显减少。后来,在空间映射算法的基础上逐渐发展出现了渐进空间映射、隐式空间映射(ISM)和神经网络空间映射等多个门类<sup>[5]</sup>。

参数提取是隐式空间映射中最重要的一环,然而由于参数提取过程中辅助参数的随机性,常会出现收敛速度慢甚至假收敛的情况<sup>[6]</sup>。因此,在隐式空间映射算法参数提取过程中引入改进的蛙跳算

收稿日期:2016-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61131002)

作者简介:张友俊(1961-),男,江苏扬州人,教授,硕士生导师,博士,主要从事微波技术的研究, E-mail: yjzhang@cie.shmtu.edu.cn.

法,限制了参数的范围,减少了优化时间。

## 1 基本理论

### 1.1 隐式空间映射算法

空间映射优化思想通过建立粗糙与精确模型设计参数之间的映射关系,获得优化过的粗糙模型,即代理模型;通过不断更新和优化,能快速仿真优化粗糙模型以更新替代模型,而将优化的结果放到精确模型中进行验证,这样精确模型只进行设计过程中的验证工作,从而把许多优化工作放到粗糙模型中来完成,充分发挥了粗糙模型快速高效和精确模型的计算精度高的特点,用最少的精确模型仿真次数获得满意的优化结果。而隐式空间映射算法又加强了空间映射算法设计的简洁性,减少了计算误差<sup>[7-8]</sup>。设  $R_f(x_f)$  为点  $x_f$  的精确模型响应,有

$$x_f^* \triangleq \arg \min_{x_f} U(R_f(x_f)) \quad (1)$$

式中:  $U$  为需要求解的目标函数;  $x_f^*$  为精确模型参数。精确模型的电磁仿真通常耗时较长,故一般不直接优化式(1)。由于粗糙模型是精确模型某种程度的近似,且优化简单,一般通过优化粗糙模型来间接实现优化精确模型的目的。设  $x_c^{*(j)}$  为粗糙模型的优化参数,  $p$  为参数提取时进行优化的参数,  $R_c(x_c^{*(j)}, x^{(j)})$  为相应的粗糙模型响应。在第  $j$  步迭代中,  $x_f, x_c$  和  $p$  之间满足下式要求:

$$Q(x_f, x_c, p) = 0 \quad (2)$$

式中参数  $p$  的求解过程叫参数提取。参数提取过程完成后,将优化粗糙模型得到的  $x_c^{*(j)}$  直接代入精确模型进行电磁计算:

$$x_f = x_c^{*(j)} \quad (3)$$

若精确模型的响应满足要求,则停止优化,否则再次进行参数提取。如此循环优化直到精确模型的响应满足目标<sup>[9]</sup>。

### 1.2 改进的蛙跳算法

蛙跳算法(SFLA)是由 Eusuff M. M. 和 Lansey 于 2003 年提出的一种启发式群体进化算法<sup>[10-11]</sup>, SFLA 的步骤可分为全局搜索和局部搜索。

该算法的全局执行步骤如下:

- 1) 确定整个蛙群的数量  $F$ 。
- 2) 随机选取部分青蛙作为初始蛙群,计算初始蛙群中各个蛙的最适值。
- 3) 根据最适值按照从大到小的顺序进行排列,找出蛙群中的最优解  $p_g$ 。
- 4) 局部搜索过程,即在每一个族群中根据

SFLA的算法公式进行进化。

a) 计数器初始化。设族群的序号  $im=0$ ,它用来标记当前进化到了哪个族群并与族群总数  $m$  进行比较。设独立进化次数的序号  $in=0$ ,它用来和进化次数  $L_s$  比较,从而判断进化是否结束。同时,寻找当前族群  $Y^{im}$  中的最佳个体位置和最差个体位置,分别记为  $P_B$  和  $P_W$ 。

b) 设  $im=im+1$ ,进行下一个族群。

c) 设  $in=in+1$ ,进行下一次独立进化。

d) 利用下式来更新当前族群中最差青蛙的位置:

青蛙更新的步长:

$$STEP = \begin{cases} \min(\text{rand}() \times (P_B - P_W), S_{\max}) \\ \max(\text{rand}() \times (P_B - P_W), -S_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

青蛙的新位置:

$$D_w = P_w + STEP \quad (5)$$

式中:  $\text{rand}()$  函数产生一个  $[0, 1]$  范围内的随机数;  $S_{\max}$  为青蛙跳跃的最大步长。

e) 如果步骤 d) 最差蛙的位置得到改进,最差蛙的位置将被替换,否则就采用全局最好解  $P_g$  代替式(4)中的  $P_B$ ,更新最差蛙的位置。

f) 如果步骤 e) 中最差蛙的位置没有得到改进,则随进产生一个蛙代替最差蛙的位置。

g) 更新种群的  $P_B$  与  $P_W$ 。

h) 如果  $in < L_s$ ,则跳到步骤 c), 否则进行步骤 i) 并让  $in=0$ 。

i) 如果  $im < m$ ,则跳到步骤 b), 否则跳出局部搜索,回到全局搜索。

5) 重新进行族群划分并检验计算停止条件。若满足算法收敛条件,则停止计算,否则跳转到步骤 3)。

### 1.3 参数提取

对于隐式空间映射算法(ISM),代理模型优化参数的初始值设置的不同,得到的优化结果就不相同,导致精细模型逼近响应目标有差异。经过仿真验证在参数提取过程中引入改进的 SFLA,可以有效地减少迭代次数,得到符合要求的指标。

根据改进的 SFLA 的启示,可以设预提取的参数中个体参数的最优解为  $P_B$ ,最差解为  $P_W$ ,  $S_{\max}$  为参数的最大范围。

将其代入式(4)、(5)可得到参数的一个新解,再

按照 SFLA 的判别步骤得到全局最优解。

一般选取单元电路的介电常数  $\epsilon_r$  和介质层厚度  $h$  作为预选参数。预选参数只在粗糙模型中变化,在精细模型中单元电路的介电常数和介电质厚度保持不变。将 SFLA 用于隐式空间映射算法中的参数提取中,是改善和增强算法收敛性的一种有效手段,且不易带来额外的误差,保证算法的有效性。

## 2 双频滤波器设计实例

本文通过设计一个双频滤波器,验证了 SFLA 在参数提取过程中的优越性,滤波器的精细模型结构如图 1 所示。图中,  $W$  为两个器件之间连接线的宽度,  $L$  为连接线的长度,  $g$  为 2 个耦合器件(相邻 2 个器件但是不通过线连接)的间距。为了加快仿真过程,使滤波器部分参数保持不变,微带耦合线宽  $w_1=0.6\text{ mm}$ ,  $w_2=0.2\text{ mm}$ , 抽头微带线特性阻抗为  $50\ \Omega$ , 其他设计参量为

$$x_f = [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, g] \quad (6)$$

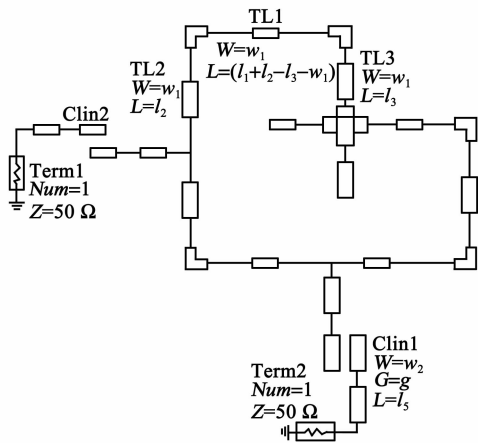


图 1 双频滤波器精细模型结构及各参数

所选用的介质基板介电常数为 2.65, 介质厚度为 1 mm, 其电路模型如图 2 所示, 各电路单元按照设计参量设置。预选参数提取变量为各个电路单元的介电常数和介质层厚度:

$$x_p = [\epsilon_{r0}, \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \epsilon_{r3}, \epsilon_{r4}, h_0, h_1, h_2, h_3, h_4] \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_{r1}$  和  $h_1$ ,  $\epsilon_{r2}$  和  $h_2$  分别为耦合线 Clin1、Clin2 的介电常数和介质层厚度;  $\epsilon_{r3}$  和  $h_3$ ,  $\epsilon_{r4}$  和  $h_4$  为微带线 TL1、TL3 的介电常数和介质层厚度;  $\epsilon_{r0}$  和  $h_0$  为其他微带线的介电常数和介质层厚度。相应对角线对称位置预选参数值相同。

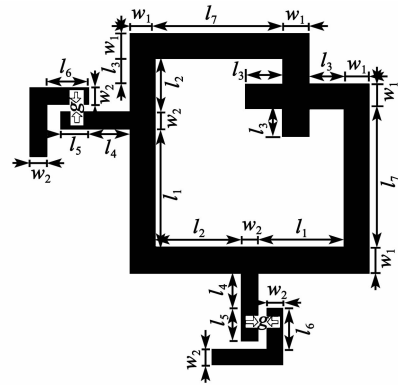


图 2 双频滤波器粗糙模型结构及各参数

在仿真过程中,先在粗糙模型中设计好优化的目标,然后将达到要求的滤波器设计参数代入精确模型中,仿真结果如图 3 所示。由图可看出, 2 个通带中心频率均向右偏移, 不满足指标要求, 需要进一步迭代优化, 因此进入参数提取步骤, 对提取参数的范围用 SFLA 中式(4)、(5)进行限制, 保持其值不变, 再次对粗糙模型进行优化, 将得到的优化参数值导入 HFSS 中进行验证, 如此循环迭代直至达到设计指标要求, 完成整个算法流程。3 次迭代的过程如图 4 所示, 迭代过程中设计参量的值如表 1 所示。

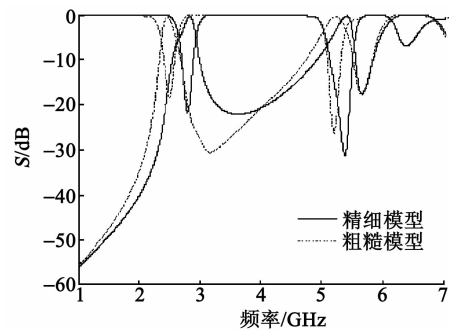


图 3 2 个模型初始计算结果

表 1 滤波器设计参数优化值

参数	$l_1/\text{mm}$	$l_2/\text{mm}$	$l_3/\text{mm}$	$l_4/\text{mm}$	$l_5/\text{mm}$	$l_6/\text{mm}$	$l_7/\text{mm}$	$g/\text{mm}$
初始值	12.545 5	6.798 0	9.454 5	0.100 2	5.000 0	2.154 6	7.929 3	0.100 7
第 1 次	12.015 9	7.126 4	9.561 8	0.143 2	5.486 9	2.067 9	8.024 9	0.115 4
第 2 次	12.763 2	6.594 8	9.374 9	0.210 3	4.673 2	2.159 3	7.853 1	0.102 8
第 3 次	12.587 9	6.801 4	9.458 0	0.145 7	5.102 7	2.160 4	7.931 5	0.108 4

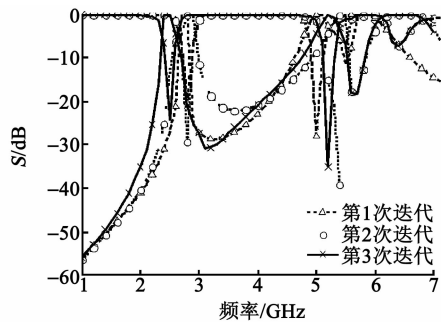


图4 3次迭代的响应结果

为使数据更具有实际性,对第3次迭代后的数据进行精度的取舍,得到双频滤波器最佳的设计参数为: $l_1=12.6$  mm, $l_2=6.8$  mm, $l_3=9.4$  mm, $l_4=0.1$  mm, $l_5=5.1$  mm, $l_6=2.1$  mm, $l_7=8.0$  mm, $g=0.1$  mm。由第3次迭代后的响应结果图(见图5)可看出,滤波器2个中心频率分别约为2.45 GHz和5.25 GHz,带内回波损耗大于20 dB,带外抑制性能良好,可以工作在无线局域网(WLAN)。

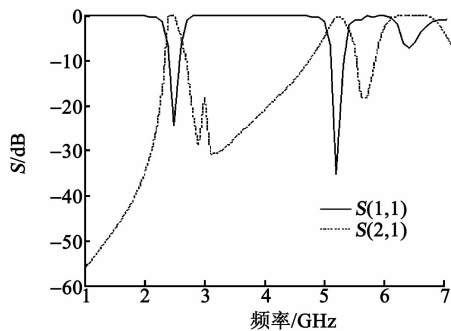


图5 S参数微调后的滤波器响应

### 3 结束语

本文主要研究了SFLA在隐式空间映射算法中的应用,并设计一个中心频率为2.45 GHz和5.25 GHz的微带双频段滤波器进行验证。在参数提取过程中运用SFLA进行参数限制,有效地改善了迭代过程中算法的收敛性,并通过实验仿真验证了算法的有效性和准确性。

### 参考文献:

- [1] KOZIEL S, CHENG Q S, BANDLER J W. Space mapping[J]. Microwave Magazine IEEE, 2008, 9(6): 105-122.
- [2] GEWIN V. Space mapping: The state of the art[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2012, 22(6): 639-651.
- [3] KOZIEL S, CHENG Q S, BANDLER J W. Fast EM modeling exploiting shape-preserving response prediction and space mapping[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62(3):399-407.
- [4] HEY J, TEO T J, BUI V P, et al. Electromagnetic actuator design analysis using a two-stage optimization method with coarse-fine model output space mapping [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10):5453-5464.
- [5] TU S, CHENG Q S, ZHANG Y, et al. Space mapping optimization of handset antennas exploiting thin-wire models[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(7):3797-3807.
- [6] KOZIEL S, BANDLER J W, CHENG Q S. Constrained parameter extraction for microwave design optimisation using implicit space mapping[J]. Iet Microwaves Antennas & Propagation, 2011, 5(10): 1156-1163.
- [7] KOZIEL S, CHENG Q S, BANDLER J W. Implicit space mapping with adaptive selection of preassigned parameters[J]. Iet Microwaves Antennas & Propagation, 2010, 4(3):361-373.
- [8] 邢连发,雷振亚,谢拥军,等. 新型高收敛隐式空间映射算法设计微波滤波器[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3):744-748.  
XING Lianfa, LEI Zhenya, XIE Yongjun, et al. A new implicit space mapping with high convergence for microwave filter design[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3):744-748.
- [9] ZHANG G, ZHAO H L. Optimization of microstrip dual-band filter with implicit space mapping algorithm [C]//India: Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011 IEEE International Conference on IEEE, 2011:1-3.
- [10] SUN Z, SHI L H, ZHANG X, et al. Unconditionally stable leapfrog algorithm of the split-field FDTD for periodic structures[J]. Microwave & Wireless Components Letters IEEE, 2014, 24(2):78-80.
- [11] WATANABE T, TANJI Y, KUBOTA H, et al. Fast transient simulation of power distribution networks containing dispersion based on parallel-distributed leapfrog algorithm[J]. Ieice Transactions on Fundamentals of Electronics Communications & Computer Sciences, 2007, 90-A(2):388-397.