

文章编号: 2095-4980(2019)06-0950-05

基于遗传算法的太赫兹腔体滤波器辅助设计

杜 浩, 张 勇*

(电子科技大学 极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川 成都 611731)

摘 要: 太赫兹滤波器是太赫兹系统的重要器件, 然而它的快速准确设计是难点。基于遗传算法(GA)和有限元法的联合仿真, 实现了太赫兹滤波器的快速准确设计。采用 HFSS-MATLAB-API 脚本库, 利用 HFSS 对于场仿真的精确性, 同时在 MATLAB 中基于遗传算法对结果进一步优化, 降低了试探性优化的盲目性。采用该方法设计了 210~230 GHz 带通滤波器, 测试结果表明, 带内插损均小于 0.6 dB, 带外抑制度大于 30 dB, 验证了该方法的准确性。

关键词: 太赫兹; 遗传算法; HFSS-MATLAB API 脚本库; 腔体滤波器

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.0950

Design of terahertz cavity filter based on genetic algorithm

DU Hao, ZHANG Yong*

(EHF Key Laboratory of Fundamental Science, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: The terahertz filter is an important component of the terahertz system, which is difficult to be designed quickly and accurately. Based on the co-simulation of Genetic Algorithm(GA) and finite element method, a fast and accurate design method of terahertz filter is realized. The HFSS-MATLAB-API script library is utilized in the design, which not only adopts the accuracy of HFSS for field simulation, but also reduces the blindness of tentative optimization by genetic algorithm in MATLAB. A 210–230 GHz band-pass filter is designed by this method. The measured results show that the in-band insertion loss is less than 0.6 dB and the out-of-band rejection is more than 30 dB. The accuracy of the method is verified.

Keywords: terahertz; Genetic Algorithm; HFSS-MATLAB API script library; cavity filter

滤波器作为频率选择器件是太赫兹系统中非常重要的器件。滤波器在电磁频谱低频段有着悠久的发展历史, 有一套成熟完备的设计制造体系。而对于工作在太赫兹频段的滤波器, 由于此频段特殊的波长特性, 滤波器的物理尺寸成为研究和加工的瓶颈。在众多形式中, 波导腔体滤波器具有性能和造价上的优势, 除此之外, 腔体滤波器结构简单, 对称性好, 便于进行优化和分析。

太赫兹腔体滤波器在国外起步较早, 早在 1984 年, BUI L Q 等根据 Konishi 的 E 面膜片滤波器理论研制了 142~156 GHz 带通滤波器^[1], 实测通带内插入损耗为 2.5 dB 左右。2008 年, Firas Sammoura 设计了一个五阶感性窗 97 GHz 滤波器^[2], 插入损耗为 2 dB, 相对带宽 3.15%。同时, 作者针对感性窗的厚度以及膜片倒角给滤波器性能带来的影响做了研究。其研究结果表明, 感性窗厚度会影响滤波器的中心频率, 更重要的是会恶化回波, 而倒角仅对中心频率有影响, 对插损回波基本没有影响。国内在太赫兹腔体滤波器领域起步较晚, 但发展十分迅速, 基本上已经达到了国外先进水平^[3-4], 2015 年电子科技大学的刘双采用深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)微机械加工技术制作了一个双矩形谐振腔的带通滤波器^[5], 可以工作在 1 THz 及以上频率; 同年电子科技大学的周扬帆基于超精密机械加工及 DRIE 技术设计了中心频率为 220 GHz, 340 GHz 和 0.95 THz 多个高性能太赫兹滤波器, 且插入损耗小于 1 dB, 回波损耗小于 17 dB。

从目前的论文不难看出, 太赫兹腔体滤波器的设计已经相对成熟, 其发展方向在于加工方式的革新, 以及设计适用于更高频段的滤波器的同时尽可能降低插入损耗和回波损耗^[3-4]。但是, 对于如何快速准确地设计出实

收稿日期: 2018-11-25; 修回日期: 2019-02-15

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2017JY0227)

*通信作者: 张 勇 email:yongzhang@uestc.edu.cn

用的太赫兹腔体滤波器，各论文中并没有给出一个相对简洁的方法，基本上通过仿真扫参手动逼近期望的性能，而重复性的扫参具有盲目性和主观性，很难得到最优解。基于以上问题，本文提出将仿真软件与智能算法相结合的方法，力求能快速准确地对滤波器的关键尺寸进行设计。

1 遗传算法与 HFSS—MATLAB—API

遗传算法(GA)是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。其主要特点是直接对结构对象进行操作，不存在求导和函数连续性的限定；具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力；采用概率化的寻优方法，不需要确定的规则就能自动获取和指导优化的搜索空间，自适应地调整搜索方向。

遗传算法以一种群体中的所有个体为对象，并利用随机化技术指导对一个被编码的参数空间进行高效搜索。其中，选择、交叉和变异构成了遗传算法的遗传操作；参数编码、初始群体的设定、适应度函数的设计、遗传操作设计、控制参数设定 5 个要素组成了遗传算法的核心内容^[6]。

由于滤波器参数众多且目标函数也并不唯一，遗传算法在滤波器上的应用可等效为对多元多目标函数的极值进行求解。将遗传算法应用于腔体滤波器的设计，首先要对滤波器的关键参数编/解码，方便对参数的后续进行交叉、变异等操作。而更重要的是设计适应度函数，即制定对于种群个体的评判手段，保证适应度高的个体可以产生更多子代，而适应度较低的产生子代较少，或完全淘汰。

将遗传算法应用在滤波器设计的另一个关键在于如何实现电磁仿真软件与算法之间的交互。这一问题可以利用 HFSS—MATLAB—API 脚本库解决，利用该脚本库可实现 HFSS 与 MATLAB 的数据交互，将 HFSS 对模型的仿真结果传入 MATLAB，经遗传算法分析后得到新的参数回传至 HFSS 中，通过不断迭代直至得到理想的效果^[7]，其流程框图如图 1 所示。

HFSS 中自带有一些优化算法，如拟牛顿法(Quasi-Newton)、模式搜索法(Pattern Search)等，但多为局部优化算法，且在面对多优化变量时，效率低下。使用外部算法可以根据优化参数的需要，更加切合实际设计优化函数。比软件的通用算法，可以有效减少运算量，更快得到收敛结果。

遗传算法的具体设计方法可按如下步骤：

1) 待优化变量的编码与解码。编/解码决定了变量优化时的精确度和范围，变量 x 的区间为 $[a, b]$ ，精确度是小数点后 n 位，二进制编码长度为 m ，则有：

$$2^{m-1} < (b-a) \times 10^n < 2^m - 1 \quad (1)$$

本文设计的滤波器，精确度为小数点后两位，范围取原型值左右各偏离 0.1，故编码长度为 $m=5$ 。

2) 目标函数及适应度。滤波器有带内回波和带外插损 2 个优化目标，属于多目标遗传算法，可以采用常用的权重系数变化法构建目标函数，即对各子目标函数赋予不同的权重 w_i 再求和，具体为：

$$f_1 = \sum_{f=210 \text{ GHz}}^{230 \text{ GHz}} dB(S(1,1)) \quad (2)$$

$$f_2 = \sum_{f=190 \text{ GHz}}^{200 \text{ GHz}} dB(S(2,1)) + \sum_{f=240 \text{ GHz}}^{250 \text{ GHz}} dB(S(2,1)) \quad (3)$$

$$F = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (4)$$

函数 F 值越小，对应的个体的适应度越高。权重开始设定为 $w_1 = w_2 = 0.5$ ，可根据优化结果做相应的调整。

3) 运算算子及运行参数。采用常用的轮盘赌选择运算算子，群体太小时难以求出最优解，太大则增长收敛

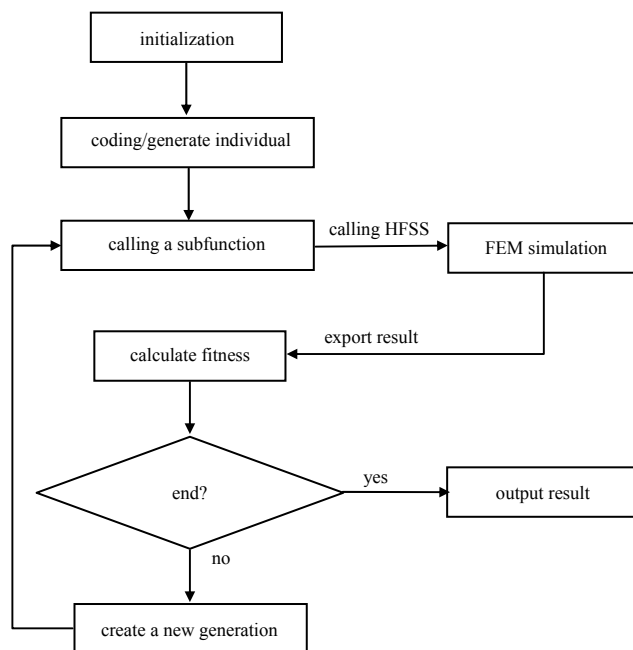


Fig.1 Flow chart of co-simulation

图 1 联合仿真流程图

时间。交叉概率太小时难以向前搜索,太大则容易破坏高适应值的结构。变异概率太小时难以产生新的基因结构,太大则使遗传算法成了单纯的随机搜索。变异算子概率可设定为 0.001,交叉算子概率设定为 0.6,种群大小设定为 100,算法的终止条件为迭代次数。

2 220 GHz 带通滤波器设计

依据上述流程,设计 220 GHz 带通滤波器,要求带内(210~230 GHz)插入损耗小于 1 dB,带外(偏离中心频率 25 GHz)抑制大于 30 dB。首先利用低频感性窗腔体滤波器设计方法构建原型^[8-10],具体方法如下:

1) 选定低通原型

根据频率选择 WR4 标准波导($a=1.092$ mm, $b=0.546$ mm),求得在 $f_0=220$ GHz, $f_1=210$ GHz, $f_2=230$ GHz, $f_a=195$ GHz, $f_b=245$ GHz 下的波导波长 $\lambda_{g0}, \lambda_{g1}, \lambda_{g2}, \lambda_{ga}, \lambda_{gb}$ 。

以切比雪夫低通原型做低通到带通的转换,则有 $f_a=195$ GHz, $\frac{\omega'}{\omega'_1}=3.12$, 在 $f_b=245$ GHz 处, $\frac{\omega'}{\omega'_1}=2.11$ 。

查阅“1 dB 纹波切比雪夫低通滤波器阻带衰减特性图”可知,要满足上述 $\frac{\omega'}{\omega'_1}$,则滤波器级数最少为 $n=5$ 。

考虑到这一设计方法应用于太赫兹频段会有一定误差,取 $n=9$,以方便后续的优化。

根据级数在“切比雪夫低通滤波器元件数值表”可查得:

$$g_0 = g_{10} = 1, g_1 = g_9 = 2.1797, g_2 = g_8 = 1.1192, g_3 = g_7 = 3.1215, g_4 = g_6 = 1.1897, g_5 = 3.1747$$

2) 计算各并联电抗、各谐振器长度及膜片尺寸

得到低通原型元件值可计算各阻抗变换器的 K 值,由 K 值可求出各并联电抗值:

$$\frac{X_{j,j+1}}{Z_0} = \frac{\frac{K_{j,j+1}}{Z_0}}{1 - (K_{j,j+2}/Z_0)^2} \quad (5)$$

并联电抗两端的负电长度应整合至谐振器长度中,则各谐振器长为:

$$\theta_j = \pi - \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{2X_{j-1,j}}{Z_0} \right) + \arctan \left(\frac{2X_{j,j+1}}{Z_0} \right) \right] \quad (6)$$

由之前所得可计算 $\frac{X_{j,j+1}}{Z_0} \frac{\lambda_{g0}}{a}$,再查阅“矩形波导电感加载图”可得膜片的大小。

滤波器感性窗结构如图 2 所示,按照上述设计流程得到的滤波器 HFSS 仿真结果如图 3 所示。



Fig.2 Structure of the filter
图 2 滤波器感性窗结构

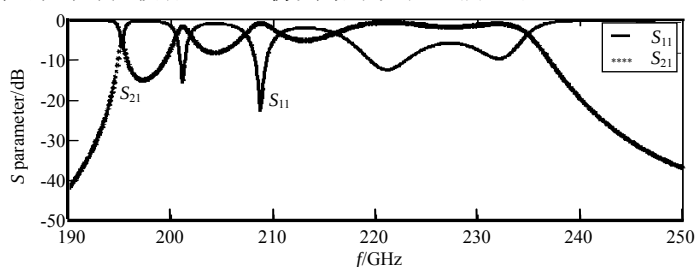


Fig.3 Simulation of HFSS
图 3 HFSS 仿真结果

可见传统的腔体滤波器设计方法应用于太赫兹频段时并不能直接得到较好的结果,但可以为后续的参数优化提供原型。进一步利用遗传算法对原型滤波器进行优化,经过反复迭代后得到仿真效果如图 4 所示,可见已达到期望的性能。

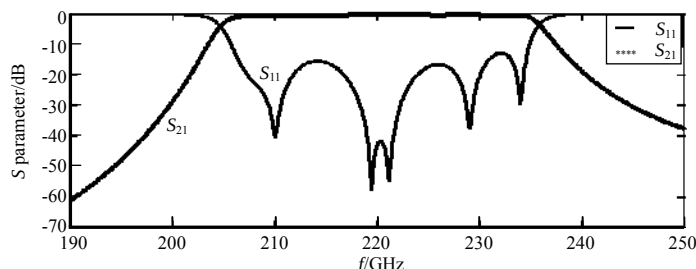


Fig.4 Optimized simulation results
图 4 优化后 HFSS 仿真结果

3 加工及测试结果

如图 5 所示,滤波器设计完成后,即可进行加工测试。选择加工精确度优于 5 μ m 的数控加工工艺,腔体表

面镀金, 厚度 $1\ \mu\text{m}$ 。由于选择机械加工工艺, 需要考虑适合该工艺的加工方法。本文选择从矩形波导宽面中央将滤波器剖分为两部分, 这样不会切断波导壁电力线, 对性能影响最小, 且为了兼容机械加工的工艺, 将滤波器模型结构中的直角均倒角 $0.15\ \text{mm}$ 。测试得到 S_{21} 曲线并与仿真曲线对比如图 6 所示。

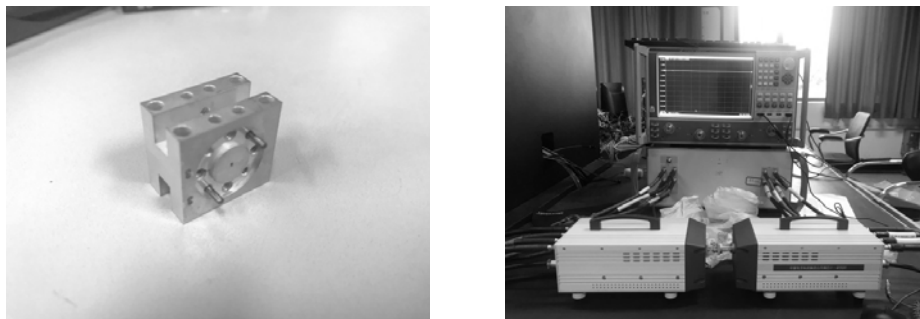


Fig.5 Picture of the fabricated filter(left) and test system(right)

图 5 加工实物(左)及测试系统(右)

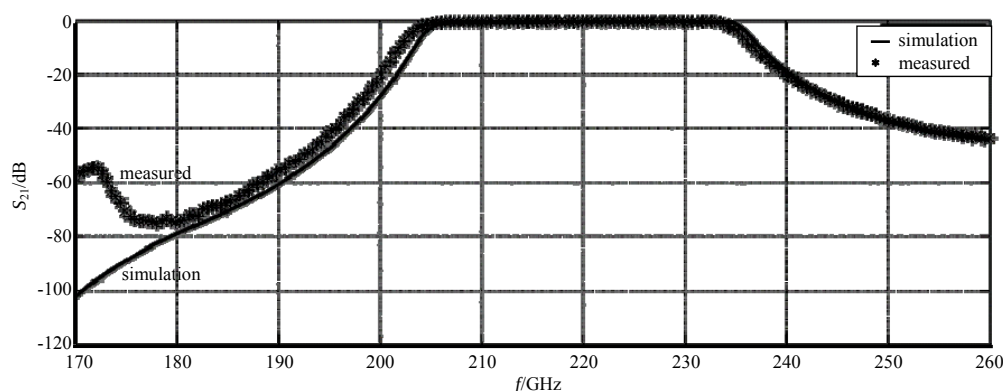


Fig.6 Simulated and measured results

图 6 测试与仿真结果对比图

可见实测效果同样满足要求, 带内插损均小于 $0.6\ \text{dB}$, 带外抑制度大于 $30\ \text{dB}$, 但同时注意到实测曲线对比仿真有轻微的频偏, 应是加工误差带来的影响。

4 结论

通过仿真和实测的验证, 利用外部算法对 HFSS 进行优化可以取得不错的结果。相比于通常的扫参时通过 S 参数曲线变化趋势进行优化, 这一方法优化的方向性更为明确, 同时也替代了重复性的扫参工作, 可以将精力更多用在算法的设计上。同时, 这一方法对于无源结构的设计具有广泛的适用性, 可以用于简化其他的无源结构的仿真。后续可以通过对滤波器理论的进一步研究, 对算法的复杂度进行优化, 得到更加高效的优化结果, 也可以在不同频段的设计中对算法的准确性进行验证, 得到广泛适用的算法。但这一方法对计算机有较高的硬件要求, 随着计算机性能的不断发展和提升, 该方法的效率也会大大提升, 有着更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] BUI L Q, BALL D, ITOH T. Broad-band millimeter-wave E-plane bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(12): 1655–1658.
- [2] SAMMOURA Firas, FUH Yiin-Kuen, LIN Liwei. Micromachined plastic W-band bandpass filters[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 47–51.
- [3] SHANG X, TIAN Y, LANCASTER M J, et al. A SU8 micromachined WR-1.5 band waveguide filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(6): 300–302.
- [4] CHEN Q, SHANG X, TIAN Y, et al. SU-8 micromachined WR-3 band waveguide bandpass filter with low insertion loss[J]. Electronics Letters, 2013, 49(7): 480–482.