

毫米波双工器的精确优化设计*

汪杰 尹雷 洪伟

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏, 南京, 210096)

TNTZ
TN 015

摘要 把改进遗传算法用于高性能毫米波双工器的优化设计。双工器采用H-面T-型结构和E-面膜片波导滤波器, 用该方法设计了3只不同频段的双工器, 并设计加工了1只毫米波波段的双工器, 设计结果和实验数据吻合较好, 证明了这种算法的精确性和有效性。

关键词 遗传算法, 双工器, 毫米波。

优化设计

ACCURATE OPTIMIZATION DESIGN OF MILLIMETER WAVE DIPLEXERS*

WANG Jie YIN Lei HONG Wei

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

Abstract The improved genetic algorithm was applied to the optimization design of high-performance millimeter wave diplexers. The waveguide H-plane junctions and the E-plane septum filters were used for designing the diplexers. The genetic algorithm was used to optimize the diplexer including optimizing the filters and the structural parameters of the diplexer itself. Three diplexers of different frequency bands were designed according to this method. One diplexer of millimeter wave band was designed and fabricated. The agreement between the theoretical and the experimental results of a millimeter wave diplexer proved the accuracy and validity of the genetic algorithm.

Key words genetic algorithm, diplexer, millimeter wave.

引言

滤波器和双工器在微波中继通信、微波通信、雷达、电子对抗及微波测量仪表中都得到极其广泛的应用。E-面膜片波导滤波器具有体积小, 损耗低, Q值高等优点, 因此受到关注^[1,2,3]。双工器则采用L. D. Cohen提出的把E面波导滤波器和波导T型相结合的双工器结构形式^[4,5,6]。

在双工器包括滤波器的设计过程中, 优化是其中一个重要步骤。常用的优化方法有Newton-Raphson方法、Powell方法^[2]和模拟退火法等。这些方法各有其优点, 但它们都有一些缺点, 前两种方法需要选取比较好的初始值, 而模拟退火法的几个典型参数如初始温度, 退火速度和温度管理等, 很难加以控制, 只能通过多次试验的方法才有可能得到比较好的结果, 这就降低了优化的效率。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^[7~10]。遗传算法是一种随机化优化方法, 具有较好的全局搜索性能。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, 本文采用改进的遗传算法^[11]来优化滤波器参数和双工器的结构参数, 这种方法的收敛速度较普通遗传算法提高了2~3倍。

1 原理

1.1 双工器的分析

本文采用图1所示H-面T型结双工器, 它可以分成滤波器、H-面T-型结, 感性窗和波导传输线4个模块进行分析。对各个模块都可以采用模式匹配法分析得到它们的广义散射参数, 然后再用广义散射矩阵的级联公式可求得整个双工器的广义散射参数(见图2)。

当用模式匹配法分析各个模块时, 由于只有x方向

* 国家杰出青年基金(编号: 69625102)资助项目
稿件收到日期 1999-03-30, 修改稿收到日期 2000-01-24

* The project supported by the National Fund for Outstanding Youth of China (No. 69625102).
Received 1999-03-30, revised 2000-01-24

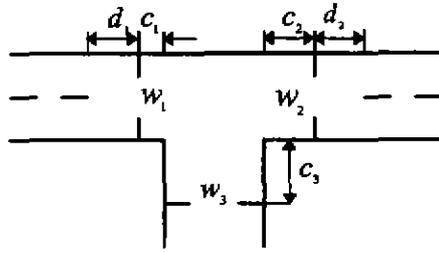


图1 H-面T-型结双工器俯视图
Fig. 1 Vertical view of H-plane T-junction duplexer

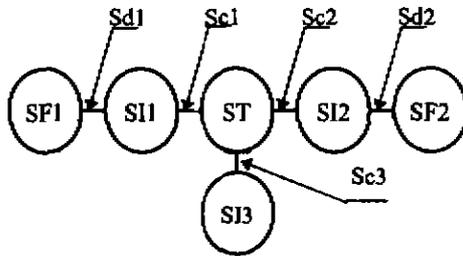


图2 双工器各模块框图
Fig. 2 Modules of duplexer

的不连续性,故主模激励时各模块可以用 TM_{n0} ($n=1, 2, \dots$)模进行分析.考虑到滤波器和感性窗的对称性,分析这两个模块时可以采用奇偶模分析法以减少计算量.文献[3]详细介绍了模式匹配法分析E-面膜片滤波器的过程,感性窗的分析和滤波器类似,本文不再重述.本文重点介绍H-面T-型结(见图3)的分析过程.

为求图3所示H面T-型结的广义散射参数 $[S]$,可以先求其广义导纳参数 $[Y]$.设第 j ($j=1, 2, 3$)个端口的切向电磁场表示为

$$\vec{E}^j = \sum_{n=1}^N V_n^j \vec{e}_n^j, \quad (1)$$

$$\vec{H}^j = \sum_{n=1}^N I_n^j \vec{h}_n^j, \quad (2)$$

则

$$Y_{ij}(q, p) = \frac{I_q^i}{V_p^j}, \quad \vec{E}^i = 0, \forall i \neq j, \quad (3)$$

式(3)表示第 i 个端口的第 q 个模式和第 j 个模式的互导纳.式(3)中 \vec{e}_n^j/h_n^j 是第 j 个端口第 n 个模式的电/磁模式函数, V_n^j/I_n^j 是相应的模式电压/流, N 表示各端口所取的模式数.广义导纳参数矩阵 $[Y]$ 是由9个块矩阵 $[Y_{ij}]$ ($i, j=1, 2, 3$)构成,每个块矩阵又是一个 $N \times N$ 阶的方阵.为简略起见,下面只介绍 $[Y_{ij}]$ ($i, j=1, 2, 3$)的求解过程,其余可类推.

由式(3)可见,为求解 $[Y_{ij}]$ ($i, j=1, 2, 3$),须把端

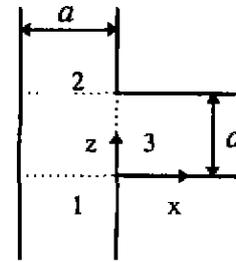


图3 H-面T-型结
Fig. 3 H-plane T-junction

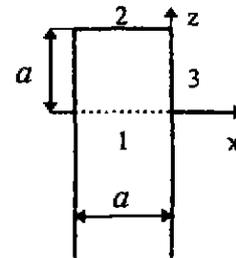


图4 端口(2)(3)用电壁封闭后的T-型结
Fig. 4 T-junction with perfect electric walls placed at ports 2 and 3

口2,3用电壁封闭(见图4).则端口1的电磁场为

$$E_x^1 = -j \sum_{n=1}^N \frac{2A_n^1}{\sqrt{Y_n^1}} e^{-j\beta_n^1 z} \sin[\beta_n^1(z-a)] \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi x}{a}, \quad (4)$$

$$H_z^1 = - \sum_{n=1}^N 2A_n^1 \sqrt{Y_n^1} e^{-j\beta_n^1 z} \sin[\beta_n^1(z-a)] \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi x}{a}. \quad (5)$$

其中 Y_n^1 是端口1第 n 个模式导纳, β_n^1 是传播常数.

对照式(1),(2),(3)和(4)可得 $[Y_{11}]$,它是一个对角阵.

$$Y_{11}(p, p) = \frac{I_p^1}{V_p^1} = j \frac{Y_p^1}{\tan(\beta_p^1 a)}, \quad (6)$$

由于端口2和端口1相同,故 $[Y_{21}]$ 也是一个对角阵

$$Y_{21}(p, p) = \frac{I_p^2}{V_p^1} = j \frac{Y_p^1}{\sin(\beta_p^1 a)}, \quad (7)$$

$[Y_{31}]$ 是一个满矩阵,可由下式求得

$$Y_{31}(q, p) = \frac{I_q^3}{V_p^1} = \frac{\int \vec{e}_q^3 \cdot \vec{H}_p^1 \cdot d\vec{s}}{V_p^1}, \quad (8)$$

其中 \vec{e}_q^3 是端口3第 q 模式的电场模式函数, H_p^1 可由式(4)求得.

$[Y_{2i}][Y_{3i}](i=1,2,3)$ 可类似得到,也可根据对称性直接由式(6),式(7)和式(8)得到.求得各块矩阵后可得到整个广义导纳矩阵 $[Y]$.再由式(9)可求得广义散射参数:

$$S = (I - Y)(I + Y)^{-1}, \quad (9)$$

式(9)中 I 是单位阵.

1.2 遗传算法在双工器优化中的应用

遗传算法是模拟生物进化过程的计算模型.它可分为如下 5 个要素:参数编码、初始群体的设定、适应度函数的设计、遗传操作设计和控制参数设定(主要指群体大小和使用遗传操作的概率等).为了提高收敛的速度,本文采用改进的遗传算法^[11],它是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.其迭代步骤如图 5 所示.

双工器的优化可分为两个步骤,先优化两个滤波器的参数,包括膜片长度(s_1, s_2, \dots)和谐振腔长度(r_1, r_2, \dots),然后把滤波器的参数作为已知值,再优化双工器的结构参数.用改进的遗传算法优化滤波器见文献[11].双工器的优化变量包括 T-型结三个端口到感性窗的距离(c_1, c_2, c_3),感性窗开口的宽度 w_1, w_2, w_3 ,感性窗到两个滤波器第一个膜片的距离 d_1, d_2 (见图 1).由于用遗传算法优化时需给出优化变量的上下限,所以从物理意义上考虑,我们在优化过程中首先对各个优化变量进行规一化,传输线的长度分别对各个滤波器中心频率波导波长进行规一化,感性窗的开口宽度对波导宽边长度 a 进行规一化,这样优化变量的范围都可限制在 $[0, 1]$ 之间,考虑到实际应用中感性窗的开口不会太小,故可以把 w_1, w_2, w_3 的变化范围限制在 $[0.3, 1]$ 之间,目标函数的选取对优化过程也有一定的影响^[11].在滤波器的优化中,我们必须同时考虑滤波器带内和带外的特性,所以目标函数必须兼顾滤波器的插入衰减和回波损耗,这样就产生了多种目标函数的选取方法^[11].但在对双工器结构参数的优化过程中,我们可以只考虑双工器两个通带内的回波损耗而不必考虑带外的特性^[6].从上面的分析中我们可以得到双工器两个通带内的回波损耗是 $X = ((c_1, c_2, c_3, w_1, w_2, w_3, d_1, d_2)$ 的函数.一般的优化过程中,通常采用极小值的方法,这时常用的目标函数可表示为^[6]

$$F(X) = \sum_{n=1}^{N_1+N_2} \left[\frac{a_n}{|20 \log |S_{33}(X, f_n)|} \right]^2, \quad (10)$$

式(10)中 N_1, N_2 分别是两个通带内的频率取样点个

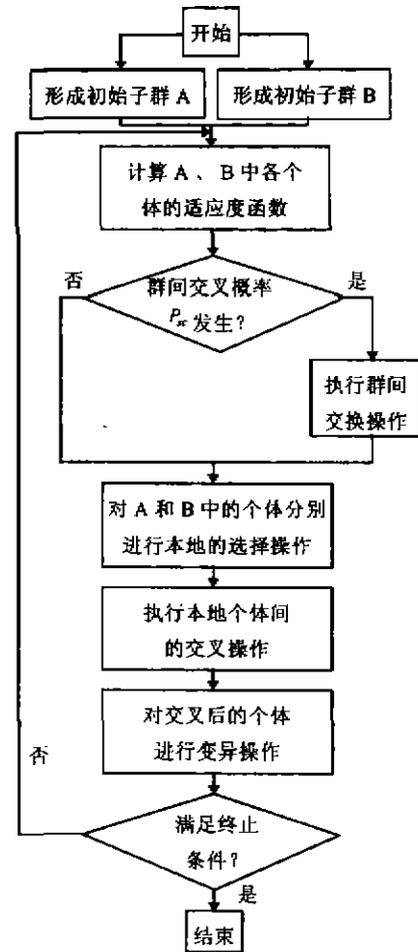


图 5 改进遗传算法的迭代步骤
Fig. 5 Iterative steps of the improved genetic algorithm

数, f_n 是频率点; S_{33} 是输入端口的反射系数,即回波损耗; a_n 是加权值.但在实际应用中我们发现,当采用这种目标函数时,由于是求和,虽然有时得到的目标函数数值比较小,但有些频率点的目标值很小,而有些点的目标值却很大,这样就达不到整体优化的目标.又因为遗传算法是对目标函数求最大值,而我们对双工器两个通带内的要求就是回波损耗达到最小值,即 $|20 \log |S_{33}|$ 达到最大值,考虑到上面求和目标函数的缺陷,我们选取如下目标函数表达式

$$F(X) = \min_{1 \leq n \leq N_1+N_2} |20 \log |S_{33}(X, f_n)|, \quad (11)$$

这样选取目标函数就能保证两个通带内最差的点也能达到要求.当然这样选取目标函数对其它诸如 Powee 法,模拟退火法等是不行的,因为这些方法求解目标函数极值时须计算其导数值,这样目标函数就必须是连续的,但式(11)是不连续的;而遗传算法的目标函数不仅不受函数必须可导的约束,甚至不要求其连续,所以

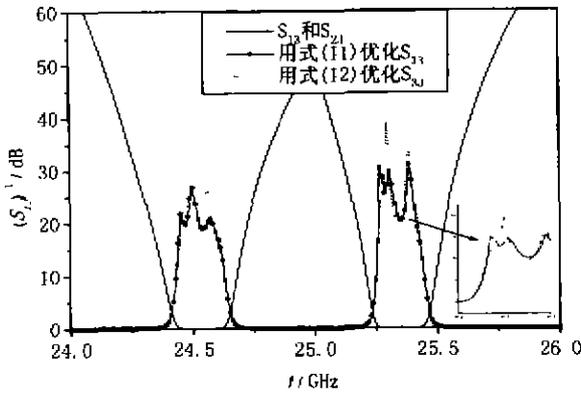


图 6 用不同目标函数优化时的结果比较
Fig. 6 Optimization results comparison between two different objective functions

用遗传算法优化式(11)是可行的. 我们分别用这两种目标函数优化了一个双工器, 相应于式(10)的用遗传算法优化的目标函数表示为:

$$F(X) = \sum_{n=1}^{N_1+N_2} 20\log(|S_{11}(X, f_n)|) \quad (12)$$

两种目标函数优化结果对比见图 6. 从图 6 中可以看出, 选用式(12)作目标函数进行优化时, 通带内性能较好, 但在频带两端却是选用式(11)比较好, 也就是滤波器的矩形系数比较好.

2 结果与分析

利用改进的遗传算法我们设计了两只不同波段的双工器. 图 7 和图 8 分别给出了这两个双工器的特性曲线, 表 1 给出了 4 个滤波器的参数, 表 2 给出了双工器的结构参数. 图 7 所示 Ku 波段双工器的两个滤波器采用文献[11]中的设计结果. 在用遗传算法优化双工器结构参数的过程中, 编码长度为 10, 群体规模均为 200, 交叉概率 $P_c=0.9$, 变异概率 $P_m=0.001$. 对于

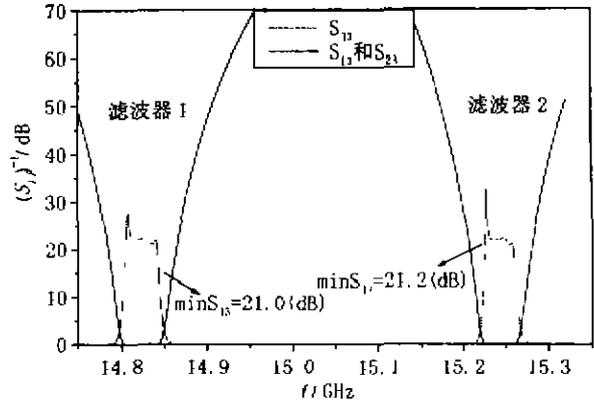


图 7 Ku 波段双工器特性
Fig. 7 Property of Ku-band diplexer

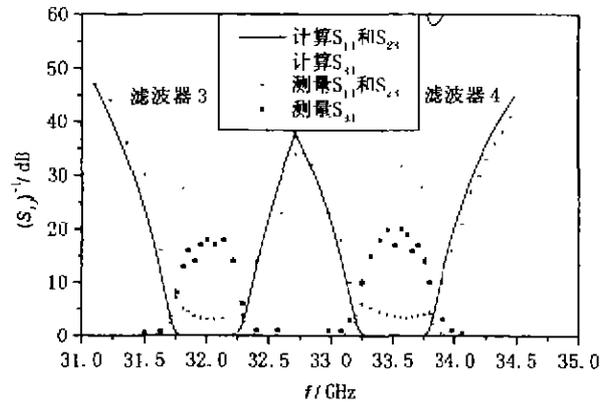


图 8 Ka 波段双工器特性 (理论和实验)
Fig. 8 Property of Ka-band diplexer (theory and experiment)

改进算法而言, 子群数目均为 2, 群间交换概率 $P_{c'}=0.1$, 群间交换率 $P_{c''}=0.01$. 所有计算均进化了 200 代. 另外为了验证设计的准确性, 我们根据设计结果加工了图 8 所示的毫米波段的双工器, 图 8 中实验数据和设计结果吻合比较好. 加工过程主要分为两步, 即

表 1 滤波器设计结果

Table 1 Results of design of the filters

滤波器	波导尺寸 (mm)	谐振腔个数	中心频率 (GHz)	3dB 带宽 (MHz)	滤波器膜片和谐振腔长度 $(s_1, r_1, s_2, r_2, s_3, r_3, \dots)$ (mm)
1	$a=15.799$	5	14.823	28.0	(5.83, 9.00, 15.95, 9.00, 17.92, 9.00, 17.92, 9.00, 17.92, 9.00, 15.95, 9.00, 5.83)
2	$b=7.899$	5	15.243	28.0	(6.49, 8.33, 17.83, 8.33, 19.44, 8.33, 19.44, 8.33, 17.38, 8.33, 6.49)
3	$a=7.112$	4	32.0	500.0	(1.42, 38.4, 4.33, 4.40, 4.82, 4.40, 4.33, 4.38, 1.42)
4	$b=3.556$	4	33.5	500.0	(1.60, 3.88, 4.73, 3.88, 5.26, 3.88, 4.73, 3.88, 1.60)

注: 膜片厚度为 $t=0.05\text{mm}$, s_1, s_2, \dots 是膜片长度, r_1, r_2, \dots 是谐振腔长度

表 2 双工器设计结果
Table 2 Results of design of the diplexers

双工器	感性窗厚度 (mm)	双工器设计尺寸 ($c_1, c_2, c_3, w_1, w_2, w_3, d_1, d_2$)(mm)
Ku 波段双工器 (图 7)	1.0	(3.29, 1.92, 8.80, 12.29, 13.59, 12.89, 0.58, 0.83)
Ka 波段双工器 (图 8)	0.5	(2.89, 8.92, 8.28, 5.51, 5.11, 5.64, 2.08, 2.62)

膜片的加工和 T-型结波导的加工。实验中我们发现,滤波器膜片的精度要求较高,特别是谐振腔的长度,对滤波器带内特性影响较大,而采用腐蚀技术加工膜片时由于过腐蚀等原因会导致实际尺寸和理论尺寸有一定的精度误差;另外滤波器和波导装配在一起时,有些尺寸如感性窗到膜片的距离精度难以保证,所以实验结果显示两个通带内的插入损耗较大,但两个滤波器的中心频率和带宽与设计结果吻合较好。

3 结语

本文利用改进的遗传算法优化设计了 3 只双工器,由于遗传算法具有很强的全局搜索能力,所以用它准确地优化设计高性能的滤波器和双工器,特别是要求相对带宽很窄的时候,具有很强的实用性,文中介绍了所使用的双工器的结构形式,以及优化过程中目标函数的选取方法,并给出了计算结果,为了证明这种算法的有效性和准确性,我们制作了 1 个毫米波波段的 3 只双工器,文中给出的实验数据和理论结果吻合比较好。

REFERENCES

- [1] Konishi Y, Uenakda K. The design of a bandpass filter with inductive-planar circuit mounted in waveguide. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1974, 22(10): 869-873
- [2] Shin Yi-Chi, Itoh T, Bui L Q. Computer-aided design of millimeter-wave E-plane filters. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1983, 31(12): 135-140
- [3] CHEN Yi-Yuan, YIN Lei, ZHU Xiao-Wei, HONG Wei. A powerful numerical method for analyzing E-plane waveguide filter and its CAD package. *Acta Electronica Sinica* (陈忆元, 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, 125(12): 45-49
- [4] Cohen L D, Worontzoff N, Levy J, et al. Millimeter wave multiplexer with printed circuit elements for the 88 to 100 GHz frequency range. In: *IEEE MTT International Symposium Digest*, San Francisco, 1981; 233-235
- [5] Dittloff Joachim, Arndt Frutz. Rigorous design of septate E-plane multiplexers with printed circuit elements. In: *IEEE MTT International Symposium Digest*, New York, 1988; 431-434
- [6] Dittloff Joachim, Arndt Frutz. Rigorous field theory design of millimeter-wave E-plane integrated circuit multiplexers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1989, 37(2): 340-350
- [7] Holland J H. *Adaptation in Nature and Artificial Systems*, Michigan: The University of Michigan Press, 1975, 20
- [8] De Jong K A. *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*, Ph.D. Dissertation; University of Michigan, 1975, 5
- [9] CHEN Guo-Liang, WANG Xu-Fa, ZHUANG Zhen-Quan, WANG Dong-Sheng. *Genetic Algorithm and its Application*, Beijing: People's Post and Telecommunications Publishing House (陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 王东生, *遗传算法及其应用*, 北京: 人民邮电出版社), 1996, 12
- [10] YUN Qing-Xia, HUANG Guang-Qiu, WANG Zhen-Quan. *Genetic Algorithm and Genetic Layout-A Technique for Optimization*, Beijing: Metallurgic Industry Press (云庆夏, 黄光球, 王战权, *遗传算法和遗传规划——一种搜索寻优技术*, 北京: 冶金工业出版社), 1997, 10
- [11] YIN Lei, HONG Wei. An improved genetic algorithm and its application in E-Plane waveguide filter design. (尹雷, 洪伟, 改进遗传算法在 E 面波导滤波器设计中的应用, *电子学报*), 2000, 28(3): 121-124