

鳍线滤波器的计算机辅助设计及研制

叶建芳

(东华大学信息科学与技术学院, 上海, 200051)

摘要 介绍了鳍线滤波器的设计原理, 针对鳍线滤波器难以调节的弱点, 运用微波电路 CAD 技术中的节点导纳法对其频响特性进行分析, 从而有效避免了因重复加工造成的浪费。最后着重分析滤波器结构尺寸的误差对其频响特性的影响。这对研制过程具有一定的指导意义。

关键词: 鳍线滤波器, 计算机辅助设计, 误差分析

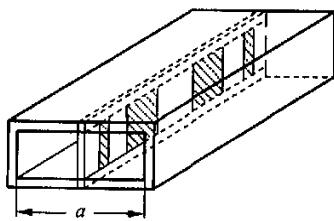
中图法分类号: TN 402

近年来鳍线滤波器已在微波各领域得到广泛应用。这里介绍的鳍线滤波器用于 Ku 波段上变频器的第二变频部分, 用它抑制由第一变频产生的各种杂波, 特别是镜频, 以避免它们与第二本振混频而影响上变频器的频谱纯度。鳍线滤波器的封闭结构大大地减小了辐射损耗, 提高了 Q 值。通过选择合适的波导尺寸, 利用波导本身的高通特性可将许多低频杂波全部抑制。研制结果表明它对干扰频带内的杂波具有非常尖锐的截止特性。并且制作简单方便。其不足之处在于鳍线加工好之后无法调节。为了克服该缺点, 借助于计算机对设计结果进行模拟分析及优化

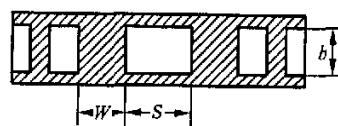
处理, 从而得到最佳尺寸, 以避免反复加工所造成的浪费。还进行了一些误差分析, 用于指导实践^[1-3]。

1 设计原理

鳍线滤波器采用自制波导, 宽边 $a = 12.96 \text{ mm}$, 窄边 $b = 6.48 \text{ mm}$ 。用冲制切割技术将波导沿宽边中心 E 面纵向抛开, 在其中嵌入鳍线, 结构见图 1。鳍线是由相对介电常数为 $\epsilon_r = 2.7$, 厚度 $h = 0.25 \text{ mm}$ 的基片二面敷以厚度 $d = 0.018 \text{ mm}$ 的铜箔组成。



(a) Fin-Line 滤波器



(b) Fin-Line 滤波器的插入膜片

图 1 鳍线滤波器的结构

通常纵向 E 面的不连续性用 T 型网络等效。如图 2 所示, 以往的理论证明 X_s 及 X_p 均为电感性的, 所以窄金属条有电感条之称。设 $y^{(1)}$ 和 $y^{(2)}$ 分别是中心平面 $T_0(z = w/2)$ 处呈短路(电壁)和开路(磁壁)时, 在 $z=0$ 处的 T_1 面向右看去等效电路的归一化导纳, 求得:

$$jX_s = 1/Y^{(1)} \quad jX_p = 1/2(1/Y^{(2)} - 1/Y^{(1)})$$

利用模式匹配法和变分法及有关数值计算^[4, 5], 可求得 T 型网络的参量 X_s 和 X_p 值, j 代表复数的虚部。这两个参量是中心频率, 金属条宽度及波导尺寸的函数, 也是鳍线基片介电常数 ϵ_r 和铜箔厚度 d 的函数。

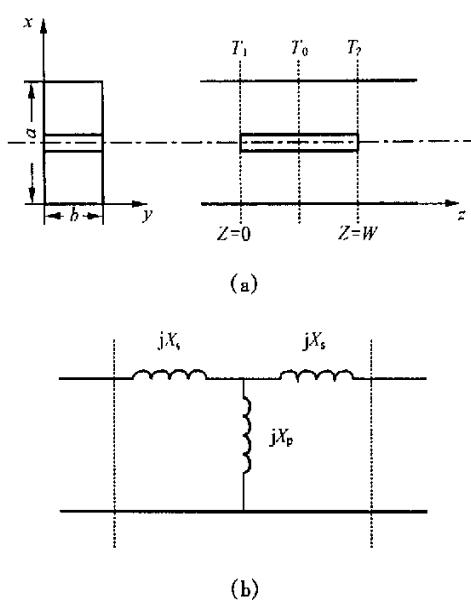


图2 金属电感条的几何结构及T型网络等效电路

采用 K 变换器带通滤波器的设计方法。金属条等效为 K 变换器,在相邻谐振器之间起耦合、匹配作用,谐振器由长度近似于 $\lambda_g/2$ 的传输线实现。原理图参看图3。根据网络理论的综合法可知^[6, 7]:

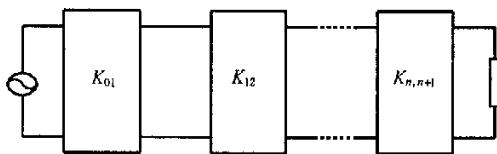


图3 平面电路波导带通滤波器的等效电路

$$K_{01}/Z_0 = [\pi\Delta/(2g_0g_1)]^{1/2}$$

$$K_{i,i+1}/Z_0 = \pi\Delta/[2(g_i g_{i+1})]^{1/2}$$

$$i = 1, 2, \dots, (n - 1)$$

$$K_{n,n+1}/Z_0 = [\pi\Delta/(2g_n g_{n+1})]^{1/2}$$

其中 $\Delta = (\lambda_{g_1} - \lambda_{g_2})/\lambda_{g_0}$, $\lambda_{g_1}, \lambda_{g_2}, \lambda_{g_0}$ 为通带上下限和中心频率所对应的鳍线波导波长。 g_0, g_1, \dots, g_{n+1} 是低通原型元件值。

因为 K 变换器的等效电路是前述的 T 型网络, 网络中的 X_s, X_p 及 Φ 与 K 有下述关系:

$$K/Z_0 = |\tan(\Phi/2 + \tan^{-1}(X_s/Z_0))|$$

$$\Phi = -\tan^{-1}(2X_p/Z_0 + X_s/Z_0) - \tan^{-1}(X_s/Z_0)$$

$$\tau_m = \lambda_g/2 + \lambda_g(\Phi_{m-1,m}/2 + \Phi_{m,m+1}/2)/2\pi$$

其中 $m = 1, 2, \dots, n$

其中 K, Φ 分别为变换器的阻抗及相位参数, τ_m 为谐振器的长度。

2 CAD 及优化技术

由于模式匹配法和变分法涉及大量复杂的数值计算, 再加上鳍线滤波器的不可调性, 如果通过反复加工出实物进行电特性测量, 以求得最佳滤波器结构尺寸, 这样势必导致大大提高制作成本, 拉长设计周期。为此借助于计算机进行设计分析、优化, 从而得到最佳的滤波器结构尺寸。编写设计程序求得鳍线的金属带宽度 W 及腔长 S (如图1所示)的初步尺寸。然后将滤波器定模为电感、传输线组成的电路, 编写分析程序, 用节点导纳法分析滤波器的电特性, 并在程序中附加优化条件, 对滤波器的尺寸进行扫描, 以求得满足设计要求的特性曲线, 这样就得到了滤波器金属带宽度 W 及腔长 S 的最佳值。

2.1 设计要求

带通滤波器的技术指标为:

$$f_0 = 14.25 \text{ GHz} \quad f_1 = 13.95 \text{ GHz} \quad f_2 = 14.55 \text{ GHz}$$

带宽为 600 MHz, 带内损耗 < 1 dB, 阻带损耗 > 50 dB。

阻带频率为 13.55 GHz 和 14.95 GHz。

2.2 设计结果

经过计算机辅助分析与优化设计得出鳍线滤波器的结构尺寸。表1给出鳍线滤波器各金属条的宽度 W 及谐振器腔长 S 的初始值及最佳值。

表1 鳍线滤波器的结构尺寸

	$W(1)$	$S(1)$	$W(2)$	$S(2)$	$W(3)$	$S(3)$	$W(4)$	$S(4)$
初始值	4.077	7.241	6.434	10.021	6.934	9.991	6.118	8.412
优化值	3.468	8.472	5.696	10.948	5.874	10.628	5.468	8.872

2.3 测试框图

滤波器频响特性曲线的测试电路所用设备及器件见图4。

2.4 测试结果

由图4给出的测试电路可得到鳍线滤波器的频响特性曲线, 如图5所示。

图5给出的测试结果表明, 设计完全达到要求的技术指标。

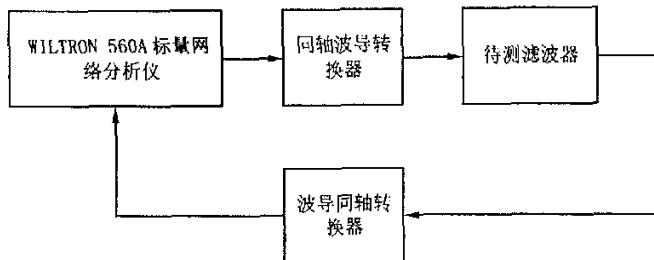


图4 滤波器频响特性曲线测试电路方框图

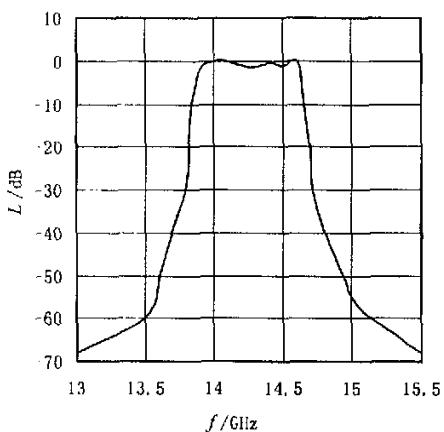


图5 滤波器实测频响特性曲线

3 误差分析

在研制过程中,加工了3个尺寸相同的波导。将同一鳍线嵌入不同的波导,发现其中有一个中心频率发生了较大的偏移。经检查发现由波导加工尺寸的误差所致,这一现象提醒了我们误差分析的重要性和必要性。

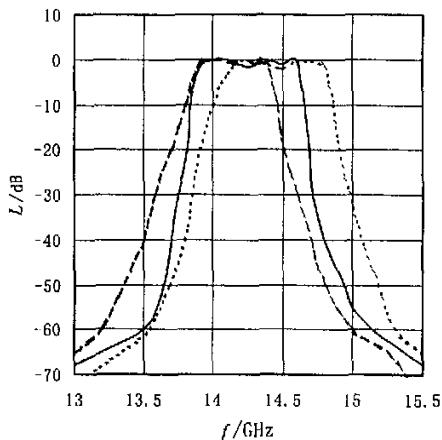
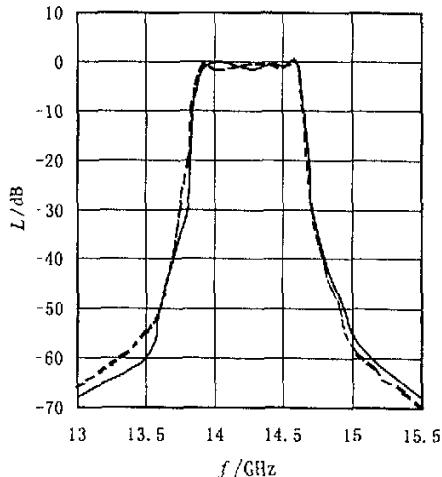
模式匹配法和变分法分析的结果表明 T 型网络的参量 X_s, X_p 是波导尺寸、鳍线基片相对介电常数为 ϵ , 和铜箔厚度 d 的函数。用节点导纳法定模分析时,参量 X_s, X_p 的值直接影响滤波器的频响特性,这从理论上解释了前述的误差现象。避开实际问题不谈的话,设计者总是希望加工及材料的精度越高越好,但这是以高成本为代价的。如设计者能了解到某些因素对要求的技术指标影响不大,则在选料中可放宽标准以降低成本,而对那些举足轻重的因素则要精益求精。因为它们的失之毫厘,会产生谬以千里的结果,这也就是误差分析的意义之所在。下面就本文研制的滤波器为例进行三方面的误差分析。

(1) 波导宽边有 $\pm 1.3\%$ 的误差。

(2) 基片上所敷铜片的厚度 d 有 11.1% 的误差。

(3) 基片的相对介电常数有 $\pm 7.4\%$ 的误差。

图6、7、8给出了这3种情况下滤波器频响特性发生偏移的理论分析值。为了直观起见,使正负误差的曲线与标准值时滤波器的频响特性位于同一坐标系中,横坐标 f 为频率,纵坐标 L 为插入损耗。各图中

图6 波导宽边 a 偏离标准值图7 铜箔厚度 d 偏离标准值

的实线代表标准值时滤波器的频响特性,划线代表正向误差,点线代表负向误差。

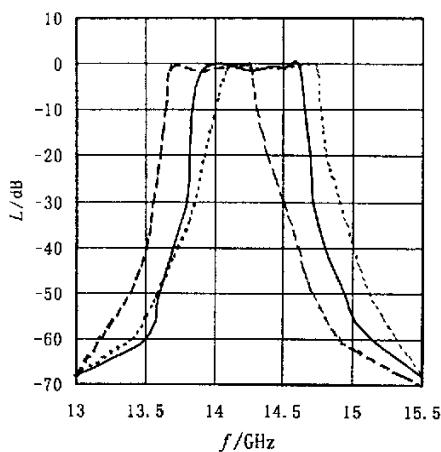


图8 介质基片的介电常数 ϵ_r 偏离标准值

4 结论

对波导尺寸偏离标准值所产生误差的理论分析

结果得到实验验证。分析结果表明波导尺寸及基片相对介电常数的误差都会导致滤波器响应产生较大的偏移,因此对波导加工精度要求较高,且要选择介电常数精度高的基片,基片两面所敷铜箔厚度的误差对滤波器响应曲线影响不大,不要求其有严格的精度。

参 考 文 献

- [1] 薛嘉庆.最优化原理与方法.北京:冶金工业出版社,1992.87~102
- [2] 杨昆.最优化方法在微波电路设计中的应用.北京:电子工业出版社,1994: 42~58
- [3] 高葆薪.微波电路计算机辅助设计.北京:清华大学出版社,1990: 71~92
- [4] LQBUI, DBALI.. Broad-band millimeter-wave E-plane bandpass filter IEE MTT-S Digest, 1988, 12: 221~225
- [5] JSHONG, SMSHI. CAD of ka-band fin-line filter. ELECTRON LETTER, 1997, 3: 80~85
- [6] 李嗣范,陈亿元.平面电路波导带通滤波器设计.北京:电子工业出版社,1988: 38~56
- [7] 甘本拔,吴万春.现代微波滤波器的结构与设计.上海:科学技术出版社,1993: 55~80

Design and Development of Fin-line Filter by CAD

YE Jian-fang

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai, 200051)

Abstract This paper briefly introduces Fin-Line design theory. With regard do the difficulty in Fin-Line cut-and-try, CAD methods are used to analyze frequency response of the filter. The waste by multi-manufacturing can be avoided. Finally, the paper presents a detailed discussion on the effect to the frequency response caused by the configuration dimension errors. The conclusion can give a meaningful instruction to develop the filter.

Keywords: fin-line filter, computer-aided-design, error analyze

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>