

Ka 波段 E 面波导滤波器的误差研究

陈彦发^{1,3}, 吕国强^{1,2,3}, 蔡斐^{1,2}

(1. 特种显示技术教育部重点实验室 安徽合肥 230009; 2. 合肥工业大学 光电技术研究院 安徽合肥 230009;
3. 合肥工业大学 仪器与光工程学院 安徽合肥 230009)

摘要:介绍 E 面波导滤波器基本结构与原理及蒙特卡罗数值模拟方法, 并首次将此模拟方法与微波仿真相结合, 实现对微波元件的误差分析。以 Ka 波段 E 面滤波器为例, 分别对膜片的厚度、位置偏置、谐振腔长度与耦合膜片尺寸误差进行数值模拟, 研究误差对性能的影响情况。最后综合设计了一款符合要求的 E 面波导滤波器。

关键词: E 面; 滤波器; 误差; 微波器件

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2009)13-011-04

Research on Errors of E-plane Waveguide Filter of Ka Band

CHEN Yanfa^{1,3}, LV Guoqiang^{1,2,3}, CAI Fei^{1,2}

(1. Key Lab of Special Display Technology Ministry of Education, Hefei, 230009, China;

2. Academy of Opto-electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China;

3. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China)

Abstract: Both the basic structure and principles of waveguide E-plane filter are introduced with Monte Carlo numerical simulation in this paper. Error of the waveguide E-plane filter is analyzed by Monte Carlo method and simulation method. As an example Ka-band filter is analyzed, errors of thickness and size, position deviation of E-plane septum, error of length of Resonator are simulated numerically. Finally, E-plane waveguide filter met the requirements is obtained by integrated simulation.

Keywords: E-plane; filter; error; microwave devices

0 引言

微波滤波器是微波系统中用来分离或组合各种不同频率信号的重要元件, 它在微波中继通讯、卫星通讯、雷达、电子对抗及微波测量仪表中都有极其广泛的应用。为了满足各种不同的用途, 出现了许多种类的微波滤波器。1974 年 Konishi 首先提出由 E 面膜片构成的矩形波导带通滤波器^[1], 由于这种滤波器具有结构简单, 易于加工和安装, 易于批量生产, 能获得较高的 Q 值和良好的滤波特性等优点而获得了广泛的应用。

对 E 面膜片波导滤波器的研究多为滤波器的设计方法, 即用不同的算法来计算等效电路参量, 然后得到符合设计指标的 E 面膜片波导滤波器结构。由于计算机硬件与软件的飞速发展使以前繁琐的手工计算变得非常简单且准确, 对于 E 面滤波器的设计已经不再有任何困难, 但是对微波元件的误差研究却很少见到相关文献。众所周知, 微波元件的加工成本与加工精度成正比关系, 加工精度的提高就意味着成本的提高, 如何能实现即满足设计要求又能把成本降到最低的微波元

件具有实际意义。本文利用蒙特卡洛随机模拟的方法, 以 Ka 波段 E 面膜片波导滤波器为例, 分别对膜片厚度误差、偏置误差、谐振腔尺寸与耦合膜片尺寸误差进行数值模拟, 得到误差对滤波器性能的影响规律, 从而可以指导实际加工生产。

1 基本结构与原理

E 面矩形波导滤波器是利用在矩形波导中插入与 E 面平行的金属膜片。金属膜片加工成具有一定间隔的方形孔, 并夹在波导的正中间, 如图 1 所示。这样就形成了一段空波导一段膜片波导的交替结构。其中, 膜片相当于起耦合作用, 两相邻膜片之间空波导就构成谐振腔, 膜片等效成 T 型电路, 如图 2 所示。由于波导一般都是主模工作, 则 TE₁₀ 模在波导不连续性附近只能激励起 TE_{n0} 模, 不能激励起 TE_{nn} (n ≠ 0) 模和 TM_{nn} 模。这样相应的 K 阻抗变换器为:

$$K = \left| \tan \left[\frac{\varphi}{2} + \tan^{-1}(x_s) \right] \right| \quad (1)$$

$$\varphi = -\tan^{-1}(2x_p + x_s) - \tan^{-1}(x_s) \quad (2)$$

阻抗变换器的电长度可以并入单个谐振腔的电长度, 所以半波长谐振腔的实际电长度为:

$$l_k = \frac{\lambda_{g0}}{2\pi} \left[\pi - \frac{1}{2} (\varphi_k + \varphi_{k+1}) \right] \quad (3)$$

这样由相关滤波器知识即可以完成E面滤波器设计,具体方法可以参考文献[4-8]。由于E面波导滤波器的加工较为简单,故在实际生产中使用较多。为了提高某特性,也提出一些新型结构的滤波器,如:提高滤波器矩形度而提出的双膜片结构^[2],增加通带宽度而采用的偏置膜片结构^[3]等。



图1 E面波导滤波器结构图

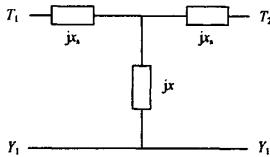


图2 E面滤波膜片等效电路图

2 误差数值模拟方法

蒙特卡罗方法(Monte Carlo method)也称统计模拟方法,是20世纪40年代中期由于科学技术的发展和电子计算机的发明,而被提出的一种以概率统计理论为指导的一类非常重要的数值计算方法,即使用随机数来解决计算问题的方法。基本原理是某事件的概率可以用大量试验中该事件发生的频率来估算,当样本容量足够大时,可以认为该事件的发生频率即为其概率。因此,可以先对影响其可靠度的随机变量进行大量的随机抽样,然后把这些抽样值一组一组地代入功能函数式,确定结构是否失效,最后从中求得结构的失效概率。随机模拟方法的计算,对于多个参数能够同时影响性能的结构非常有效且准确。

根据蒙特卡罗方法思想,E面波导滤波器的S参数函数受多个随机变量影响,如其膜片厚度、波导谐振腔的长度、膜片耦合结构尺寸等,即式(4):

$$S = f(d, d_p, l_1, l_2, \dots, l_n, zl_1, zl_2, \dots, zl_n) \quad (4)$$

当各个参数加工过程中存在的误差引起S参数变化为 ΔS ,所以有:

$$\Delta S = \frac{\partial f}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial f}{\partial d_p} \Delta d_p + \frac{\partial f}{\partial l_1} \Delta l_1 + \frac{\partial f}{\partial l_2} \Delta l_2 + \dots$$

$$+ \frac{\partial f}{\partial l_n} \Delta l_n + \frac{\partial f}{\partial zl_1} \Delta zl_1 + \frac{\partial f}{\partial zl_2} \Delta zl_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial zl_n} \Delta zl_n \quad (5)$$

只要求出每个自变量偏导值,再结合滤波器结构的加工误差,就可以实现对滤波器性能的一个预判。但对于Ka波段的微波器件,其电磁场结构都比较复杂,直接由麦氏方程组边界条件推导出结论非常困难,故只能另寻其他方法。由于近年来电子计算机强大的处理能力加上电磁软件仿真精度的提高,使得对电磁场三维模拟仿真方法成为理论推导以外的一种新方法,如CST(微波工作室)就有相当高的仿真精度。本文借助CST利用随机模拟的方法进行误差数值仿真。

根据加工方式的特点对式(5)进行简化,E面滤波器膜片在加工过程中膜片的方孔形成过程是电火花方法,各谐振腔尺寸与各耦合膜片尺寸又比较接近且误差范围也一致,故将变量 l_i (谐振腔长度)用相同的误差综合为一个参数 l ,耦合膜片长度 zl_i 也综合为参数 zl ,这样就得到了简化后的方程:

$$\Delta S_{f_0} = a_d \Delta d + a_p \Delta d_p + a_1 \Delta l + a_2 \Delta zl \quad (6)$$

式中: a_d, a_p, a_1, a_2 分别为厚度误差、偏置误差、谐振腔误差、耦合膜片误差的影响系数。具体数值模拟过程:首先分别在预先设计误差范围内根据正态分布性质利用随机函数取一个误差值 ΔR ,然后对尺寸值为 $X + \Delta R$ (X 为设计值)进行仿真,得到其各频率点的S参数并记录。然后多次重复这样操作就得到相同频率点的多个S参数值,对这些数据进行取最大与最小值处理,就可以得到S参数的区域带。最后,当仿真次数达到一定值时发现,后面的随机数值模拟S参数基本都落在前面得到的区域带内,这时即认为已经收敛。由于误差值 ΔR 是模拟实际加工中的正态随机误差,就相当于实际的滤波器加工生产,这样可以对滤波器性能的实现进行预判。

3 数值模拟及结果分析

首先,由相关文献[6-9]利用标准的BJ320波导与0.2 mm厚度的膜片,设计一款通带为34.7~35.35 GHz的5腔窄带带通滤波器,要求其带内波动小于0.5 dB,距带边300 MHz处衰减达到-20 dB,中心频率偏差小于10 MHz。然后对设计的滤波器进行结构优化得到滤波器尺寸值,最后通过CST电磁场软件进行仿真得到该滤波器 S_{21} 与 S_{11} 参数,如图3所示。

采用上述设计的滤波器S参数在通带内波动小于0.1 dB,反射系数 S_{11} 小于-20 dB,阻带抑制在36.2 GHz处衰减达到-50 dB以上,可见已达到设计要求。下面分别对E面滤波器的膜片厚度误差、膜片偏置误差与膜片方孔形状误差进行数值模拟。

图4是膜片厚度不同误差的数值模拟结果图。由图发现,误差的变化对于通带的中心频率和带宽都有影响:当膜片厚度误差为 ± 0.01 mm时,中心频率在设计值为中央的 ± 50 MHz内变动,带宽在 ± 5 MHz内变动。当厚度误差值为 ± 0.005 mm时,中心频率在设计值为中央的 ± 25 MHz内变动,带宽在 ± 3 MHz以内变动。在仿真过程中发现,厚度减少则反向偏移,并且这种规律在 ± 0.05 mm内有很好的线性。膜片的厚度误差对于通带的波动影响都比较小,以上三种误差情况下通带的 S_{21} 参数都能小于 -0.1 dB。

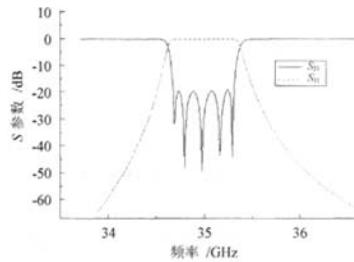


图3 优化后滤波器的S参数曲线

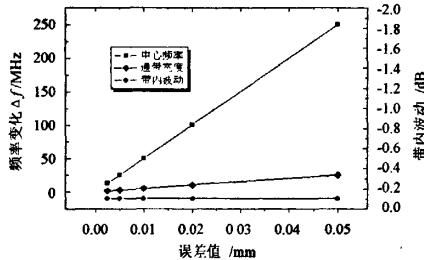


图4 膜片厚度误差模拟结果图

图5为膜片偏置误差的数值模拟仿真结果图。膜片的偏置误差与膜片厚度误差对于性能影响的情况有些相似,膜片偏置误差对中心频率与带宽的影响比较大,当误差在 ± 0.1 mm时中心频率向低频偏移35 MHz,且通带宽度宽了20 MHz,对于通带最大波动影响为 -0.1 dB;不同的是膜片偏置无论往哪个方向偏移其中心频率都向低频方向偏移,通带宽度也只变大。当误差在 ± 0.2 mm内时,此滤波器的中心频率向低频偏移140 MHz,通带宽度最大增加了75 MHz。由此得知,滤波器的膜片偏置情况与通带宽度的变化有着很大的关系,这样就可以用来实现微波滤波器的宽带化设计。

谐振腔与耦合膜片结构误差仿真结果如图6和图7所示。仿真后发现,耦合膜片尺寸的误差对滤波器影响比谐振腔误差对滤波器的影响大,膜片误差为 ± 0.005 mm时,通带宽度变化仅为10 MHz,谐振腔误差引起通带宽度变化达到120 MHz,其中心频率与变化也有相似情况。耦合膜片尺寸误差达到 ± 0.01 mm

时通带S参数几乎都小于 -0.1 dB,而谐振腔误差的通带内波动则达到 -3 dB,变化非常大。所以在设计过程中要保证波导谐振腔尺寸的误差,而耦合结构的尺寸误差可以适当的放宽一些,这样有助于降低成本。

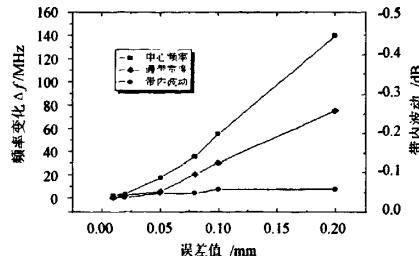


图5 膜片偏置误差数值模拟结果

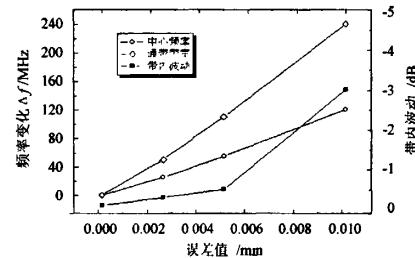


图6 谐振腔误差数值模拟结果

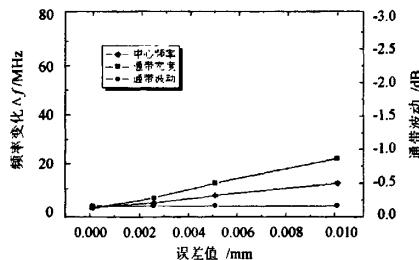


图7 耦合膜片误差数值模拟结果

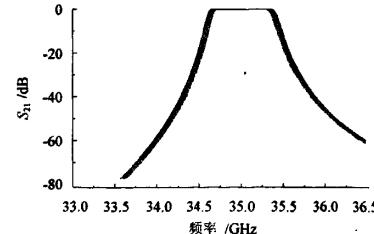


图8 滤波器综合误差数值模拟结果

综上模拟分析,实际加工生产时要综合各方面因素分配误差,使其在满足性能要求的基础上实现成本最低。综合误差分配知识^[10]与实际加工情况设计精度,厚度误差为 ± 0.0025 mm,膜片偏置误差即波导谐振腔误差为 ± 0.0025 mm,耦合膜片误差为 ± 0.02 mm。进行误差数值模拟后的结果如图8所示,通带内波动基本

小于 -0.3 dB, 阻带在 36.2 GHz 处衰减达到 -50 dB, 中心频率偏差小于 5 MHz, 完全达到预定的设计要求。

4 结语

本文通过 E 面波导滤波器误差数值模拟, 以单膜片 5 腔 E 面滤波器为例, 对膜片的厚度误差、偏置误差、谐振腔误差与耦合膜片误差进行了研究。结果表明, 膜片厚度的变化与中心频率以及通带宽度存在一定的线性关系, 而谐振腔与耦合膜片尺寸误差对滤波器影响比较复杂, 同时对带内的波动和中心频率都起一定作用。利用蒙特卡罗数值模拟方法研究滤波器可以知道误差对性能的影响情况, 故可以在满足设计要求的情况下控制加工精度, 从而更好地降低成本。这种模拟方法不仅可以对 E 面滤波器进行误差仿真, 也可以对其他结构复杂的微波无源器件进行仿真, 对于实际设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Konishi Y, Venakada K. The Design of a Bandpass Filter With Inductive Strip - planar Circuit Mounted in Waveguide

- [2] Fritz Arndt. E - plane Integrated Circuit Filters with Improved Stopband Attenuation [J]. IEEE Trans. on MTT, 1984, 32(10): 1 391 - 1 394.
- [3] 刘发林. 波导 E 面偏置金属插片宽带滤波器 [J]. 微波学报, 1998(12): 324 - 329.
- [4] 甘本波. 现代微波滤波器的结构与设计(上册) [M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- [5] 刘渝. 波导 E 面金属膜片的分析及其在滤波器设计中的应用 [J]. 电子科技, 2005(9): 45 - 48.
- [6] 张本全. 波导金属插片窄带滤波器的研制 [J]. 电波科学学报, 2002(6): 237 - 239.
- [7] 翟阳文. 矩形波导感性膜片复功率守恒法的分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2006(8): 630 - 634.
- [8] 周斌. 微波波导元件的模式匹配分析法 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [9] David M Pozar. Microwave Engineering [M]. Third Edition. John Wiley, 2005.
- [10] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.

(上接第 7 页)

- [4] 李耀民, 周正. AT89C51 并行加载 DDS 芯片 AD9850 的方法 [J]. 无线电通信技术, 2002, 28(6): 54 - 58.
- [5] 夏志敏, 武新军, 黄河. 高精度可连续调节宽带猝发信号发生器设计 [J]. 制造业自动化, 2006, 28(9): 86 - 91.
- [6] 朱武, 金长善, 孙武威. 半桥逆变式功率 VMOSFET 超声发生器的研究 [J]. 应用声学, 1998, 17(2): 40 - 43.
- [7] Ralph McArthur, John Hess. Optimizing MOSFET and IGBT Gate Current to Minimize DV/DT Induced Failures in

SMPS Circuits [J]. Advanced Power Technology Application Note, 2001, 10(29).

- [8] 李正中, 孙德刚. 高压浮动 MOSFET 栅极驱动技术 [J]. 通信电源技术, 2003, 6(3): 37 - 40.
- [9] 雷华明, 阚沛文. 电磁超声换能器的阻抗测试方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2004(1): 14 - 16.
- [10] 康磊, 王淑娟, 翟国富. 用于电磁超声检测系统的宽带匹配电路的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2007(4): 50 - 52.

作者简介 高松巍 女, 1956 年出生, 辽宁沈阳人, 教授。主要从事无损检测技术与数字信号处理等方面的研究。

李冰 男, 1981 年出生, 辽宁抚顺人, 硕士研究生。主要从事无损检测方向的研究。

邢燕好 男, 1978 年出生, 河北人, 讲师。主要从事无损检测技术与数字信号处理等方面的研究。

Core i7 /i5 /i3 型号划分体系详解

Intel 2009 年 6 月 18 日公布了新的处理器品牌体系, Core i5、Core i3 两个子系列正式亮相。按照 Intel 的说法, 新体系简化了品牌型号命名, 更有利于消费者理解和选购。不过从技术角度看, 似乎更复杂了。

以 Core(酷睿)为核心, 面向高中低端市场分别衍生出 Core i7(酷睿 i7)、Core i5(酷睿 i5)、Core i3(酷睿 i3)。

Core 2 Duo(酷睿 2 双核)、Core 2 Quad(酷睿 2

四核)、Core 2 Extreme(酷睿 2 至尊版)将逐渐淡出, 也预示着“酷睿 2”时代的终结。

Pentium(奔腾)、Celeron(赛扬)、Atom(凌动)继续存在, 面向入门级桌面市场和上网本、智能手机等移动领域。

Centrino(迅驰)从 2010 年起市场定位有所变化, 不再代表移动处理器, 而是用于 Wi-Fi, WiMAX 无线产品。

(摘自《驱动之家》)

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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>