

Design of Coaxial Filters Based On HFSS

LIU Peng-yu^{1,2}, ZHANG Yu-hu², SHEN Hai-gen¹

(1. School of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Spaceflight Institute of TT&C and Telecommunication, Shanghai 200086, China)

Abstract: Coaxial filters is widely used in microwave circuits, we research how to analysis and design coaxial filters used by a 3D full-wave field solver, HFSS. The 3D full-wave field analysis includes the effects of tuning screw, interstage coupling aperture and input/output coaxial excitation. Base on these analyses, we work out a S-band coaxial filter aided by simulating and optimizing in HFSS. The result of the experimentation matched well with the result of simulation, and fulfilled technic targets. The coaxial filter has been used in a spaceflight project successfully. The way of combining the traditional theory with the advanced computer technology has great practical value, it can save much time and cost.

Key words: microwave filters; coaxial resonator; coupling aperture; HFSS

EEACC: 1320

基于 HFSS 设计同轴腔滤波器

刘鹏宇^{1,2}, 张玉虎², 沈海根¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海航天测控通信研究所, 上海 200086)

摘要: 同轴腔滤波器在微波电路中有着广泛的应用, 在此研究如何利用 3D 全波场分析软件 HFSS 分析设计同轴腔滤波器. 该分析包括谐振腔调谐螺钉、腔间耦合孔及输入输出激励的影响效应. 基于上述分析, 借助 HFSS 仿真优化得到 S 波段滤波器. 其实测结果与仿真相符, 满足指标要求, 并已成功应用于某航天工程中. 这种结合传统理论和先进计算机技术的方法可以大大节省研制周期和生产成本, 具有非常大的实用价值.

关键词: 微波滤波器; 同轴谐振腔; 耦合孔; HFSS

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2007)02-0430-03

传统的微波滤波器设计方法已经非常成熟, 但其中一些参数需要反复试验来获得. 这势必要增加产品的设计周期, 对于当前研制周期紧、产品数量大的要求是一个制约. 利用仿真工具进行辅助设计成为目前一种非常有效的解决途径. 本文即介绍如何借助 HFSS 设计同轴腔滤波器.

1 HFSS 简介

HFSS 是 ANSOFT 公司开发的一个基于物理原型的 EDA 设计软件. 使用 HFSS 建立结构模型进行 3D 全波场分析, 可以计算.

① 基本电磁场数值解和开边界问题, 近远场辐射问题; ② 端口特征阻抗和传输常数; ③ S 参数和相应端口阻抗的归一化 S 参数; ④ 结构的本征模或谐振解.

依靠其对电磁场精确分析的性能, 使用户能够方便快速地建立产品虚拟样机, 以便在物理样机制造之前, 准确有效地把握产品特性, 被广泛应用于射频和微波器件、天线和馈源、高速 IC 芯片等产品设计中.

HFSS 有本征模解 (Eigenmode Solution) 和激励解 (Driven Solution) 两种求解方式. 选择 Eigenmode Solution 用于计算某一结构的谐振频率以及

收稿日期: 2006-04-17

作者简介: 刘鹏宇(1978-), 男, 工作于上海航天测控通信研究所, 工程师, 主要研究方向为射频与微波电路设计,

pengyu_liu@163.com;

谐振频率点的场值和腔的空载 Q_0 值. 选择 Driven Solution 用于计算无源高频结构的 S 参数和特性端口阻抗、传播常数等.

本课题的研究中, 将用到本征模解求解单同轴腔特性和腔间耦合系数; 激励解求解有载品质因数 Q_L 值和滤波器响应特性.

2 同轴腔滤波器工作原理及设计

2.1 工作原理

同轴腔滤波器主要用于米波、分米波段. 传输 TEM 模, 无色散、场结构简单稳定、空载品质因数高^[1]. 其基本结构由谐振腔、腔间耦合、输入输出激励组成, 如图 1 所示即为一个三腔同轴滤波器.

输入信号通过闭合圆环耦合到谐振腔中产生谐振, 能量在谐振腔之间由耦合孔进行逐级耦合, 再经

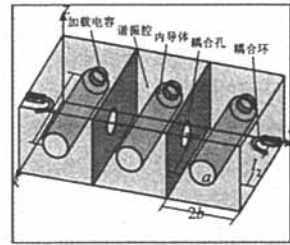


图 1 三腔同轴滤波器结构模型

($a=3.25\text{ mm}, b=9\text{ mm}, l=29\text{ mm}, l_1=l_2=14\text{ mm}$)

过输出端的闭合圆环耦合输出. 各腔均工作在同一谐振频率附近, 只有该谐振频率附近的电磁波有效传输, 形成一带通滤波器.

2.2 集总参数网络设计

下面以 S 波段滤波器设计为例, 主要技术指标见表 1.

表 1 滤波器技术指标

技术参数	工作频率	插入损耗	带宽	通带波动	阻带抑制	输入输出阻抗
	f_0	L_A	(Δf_{3dB})	L_{Av}	$L_A (f_0 \pm 15\text{ MHz})$	Z_0
指标要求	2.0~2.15 GHz	$\leq 2\text{ dB}$	$\geq 8\text{ MHz}$	$\leq \pm 0.3\text{ dB}$	$\geq 25\text{ dB}$	50 Ω

利用网络综合法^[2], 选取切比雪夫函数作为逼近函数, 查表或计算^[3]确定滤波器阶数 $n=3$, 对应的低通原型参数: $g_0=g_4=1, g_1=g_3=1.0316, g_2=1.1474$, 由此得到腔间耦合系数 K_{ij} 和外部品质因数 Q_L .

$$K_{ij} = \frac{bw}{\sqrt{g_i \cdot g_j}} = 0.0036 \quad (i=1, j=2; i=2, j=3) \quad (1)$$

$$Q_L = \frac{g_1}{bw} = 266.3 \quad (2)$$

2.3 微波结构设计

2.3.1 同轴腔

为减小体积和便于安装, 本滤波器采用内圆外方的 $1/4\lambda$ 缩短电容同轴腔结构. 依据谐振腔结构尺寸参数选取三个原则^[1]: ① 避免高次模, ($a+b$) $\leq \lambda_{\min}/\pi$; ② 满足功率容量, $b/a=1.65$ 时功率容量最大; ③ 损耗要小, $b/a=3.6$ 时 Q_0 值最高, 损耗最小. b/a 一般选择在 2.0~3.6 之间. 在此选取内导体半径 $a=3.25\text{ mm}$, 外导体内半径 $b=9\text{ mm}$.

内导体长度 l 、调谐螺钉最大调谐距离 t 的设计既要考虑能够满足所需的调谐范围, 同时还要考虑到内导体缩短会降低 Q_0 值^[4] 的因素, 一般选择内导体长度为 $1/4\lambda$ 的 65% 以上, 在此选取 $l=29\text{ mm}, t=3\text{ mm}$. 谐振腔的调谐范围将通过 HFSS 进行仿真验算.

2.3.2 耦合

考虑到本滤波器属于窄带滤波器, 腔间耦合^[5] 采用圆孔实现, 输入输出耦合采用闭合半圆环实现. 耦合圆孔、半圆环需要确定的参数是中心位置和半

径大小. 滤波器带宽基本上由级间耦合决定. 设计一个在某个频率范围内可调谐的滤波器时, 若要保持固定的带宽, 则必须控制带宽对频率的敏感性, 即要保持 $d(\Delta f)/df=0$. Cohn^[6] 研究得出, 当耦合孔中心离腔短路端距离 l_1 在中心频率电长度 36° 附近时, 耦合带宽最大且随频率变化缓慢. 则取 $l_1=14\text{ mm}$. 半圆环的几何位置通常与耦合孔保持一致, 所以也取 $l_2=14\text{ mm}$. 关于耦合孔径的大小, 下面通过 HFSS 仿真腔间耦合系数 K_{ij} 和外部品质因数 Q_L 获取.

3 HFSS 仿真分析

3.1 单谐振腔仿真

根据选定的结构尺寸 ($a=3.25\text{ mm}, b=9\text{ mm}, l=29\text{ mm}$), 在 HFSS 中对单谐振腔建模 (图 2), 不需要加载激励, 进行 Eigenmode 分析, 获取在不同间距 t 的加载电容下对应的谐振频率. 仿真结果 (图 3) 得出, 当 t 在 0.25~3 mm 之间调整, 对应谐振频率范围在 1 619~2 171 MHz 之间变化, 可以满足要求.

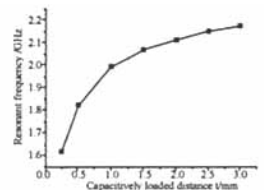
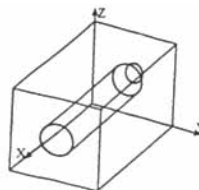


图 2 单谐振腔模型 图 3 谐振频率与加载电容关系

3.2 腔间耦合系数 K_{ij} 仿真

腔间耦合的电性能用耦合系数 K_{ij} 表示. 当两

个相邻的谐振腔耦合在一起,并且对源和负载具有非常小的耦合时, K_{ij} 与相邻腔谐振频率 f_1 、 f_2 存在如下关系^[7]:

$$K_{12} = 2(f_2 - f_1)/(f_2 + f_1) \quad (3)$$

因此,对两个相邻谐振腔在不接源和负载(图4)情况下进行 Eigenmode 分析(modes=2),得到在不同圆孔半径下对应的谐振频率 f_1 、 f_2 ,从而绘制出对应的腔间耦合系数曲线(图5)。结果表明耦合孔越大,耦合越强。

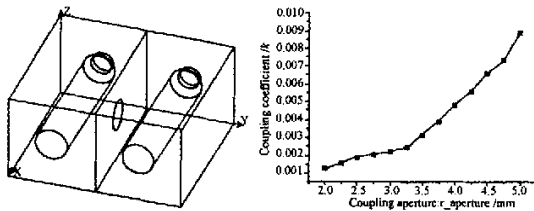


图4 腔间耦合系数仿真模型 图5 耦合圆孔与耦合系数关系

3.3 有载品质因数 Q_L 仿真

当单个谐振腔耦合源和负载时,有载品质因数 Q_L 与谐振频率 f_0 及3 dB带宽 Δf_{3dB} 存在如下关系^[7]: $Q_L = f_0/\Delta f_{3dB}$ (4)

建立模型对单谐振腔加载源和负载(图6),进

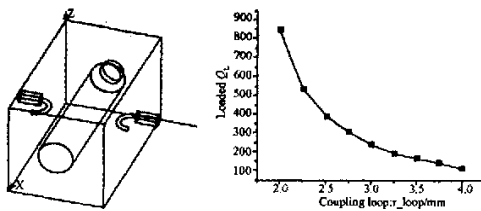


图6 有载品质因数仿真模型 图7 耦合圆环与有载品质因数关系

行 Driven Terminal 分析,得到在不同耦合圆环半径下对应的有载品质因数 Q_L 曲线(图7)。耦合环越

表3 滤波器测试数据

技术参数	工作频率 f_0	插入损耗 L_A	带宽 (Δf_{3dB})	通带波动 L_{At}	阻带抑制 $L_{As}(f_0 \pm 15 \text{ MHz})$	驻波比
指标要求	2.065 GHz	1.75 dB	8.5 MHz	0.15 dB	33.6 dB	1.34

5 结束语

本文利用 ANSOFT HFSS 仿真软件对同轴腔滤波器中的谐振腔、腔间耦合及输入输出激励进行了优化设计,确定了滤波器实际结构尺寸,测试结果与仿真一致。该方法可以有效并准确地替代传统试验方法,也可以应用在其它的微波滤波器设计中。

参考文献:

[1] 廖承恩, 陈达章. 微波技术基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
[2] 甘本祯, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1973.

大,耦合越强, Q_L 值越低。

根据公式(1)、(2)中计算结果,对照以上仿真分析图表,即可选取适当的结构参数,在 HFSS 中完成整个滤波器的建模(图1),经过进一步优化,获取理想的特性曲线,确定最终的结构尺寸: $r_{aperture} = 3.18 \text{ mm}$, $r_{loop} = 2.6 \text{ mm}$ 。

4 实测结果与分析

综合上述设计及优化结果,并考虑到为实物调试时留有一定的调整余量,耦合孔和耦合环半径均取的略小一些,确定最终的加工尺寸见表2。

表2 同轴腔滤波器结构加工尺寸

结构参数	a	b	l	t	l ₁	l ₂	r _{loop}	r _{aperture}
尺寸/mm	3.25	9	29	3	14	14	2.5	3

按照表2结构尺寸机械加工,进行适当的谐振频率和耦合调整,获得了满意的特性曲线(图8),达到技术指标要求(表3)。结果表明,插入损耗、带外抑制实测结果比与仿真结果要差一些。这是可以理解的,因为 HFSS 仿真是在理想边界条件下进行的,而滤波器实物是由三个单谐振腔和输入输出端口组合在一起的,难免会有一些缝隙,还有腔体内部镀银表面不光滑,这些都会引入损耗^[8],导致 Q_0 值降低,使得插损、带外抑制指标略有变差。

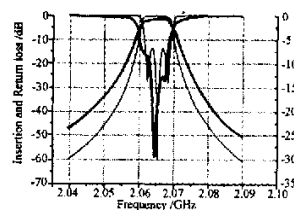


图8 实测(粗线)与仿真(细线)滤波器响应

[3] Hong Jia-Sheng. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, M. J. Lancaster Copyright© 2001 John Wiley & Sons, Inc. pp. 29-61.
[4] Kurzrok R. M. Design of Comb-Line Band-Pass Filters (Correspondence)[J]. Transactions on Microwave Theory and Techniques, Jul. 1966, T-MTT-14(7), 351-353.
[5] 姚数, 黄尚锐. 调谐滤波器的腔间耦合结构研究[J]. 微波学报, 1994(1): 16-22.
[6] Kurzrok R. M. Design of Interstate Coupling Apertures for Narrow-Band Tunable Coaxial Filters[J]. (Correspondence) IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques, March, 1961, MTT-10: 143-144.
[7] Randall W. Rhea, HF Filter Design and Computer Simulation [M]. McGraw-Hill, Inc., 1995.
[8] 高葆新. 波导带通滤波器的设计[J]. 国外电子测量技术, 2001(1): 34-37.

HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训(www.edatop.com)是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>



更多 HFSS 视频培训课程:

● 两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

● HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

● HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

● 更多 HFSS 培训课程，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

关于易迪拓培训:

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,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计相关培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>