

基于 HFSS 设计同轴腔调谐滤波器

贾建蕊, 韩 军

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北石家庄 050081)

摘要 同轴腔调谐滤波器在军事通信设备中具有广泛应用。论述了该类滤波器的设计原理, 详细分析了腔间耦合孔和输入、输出耦合环的位置和大小的设计, 在此基础上应用高频结构仿真软件 (HFSS), 对 L 波段调谐滤波器的实例进行仿真设计。结果表明仿真拟合准确, 说明应用 HFSS 仿真软件能够很好的描述调谐滤波器的关键设计内容。

关键词 滤波器; 调谐; 耦合孔; 耦合环

中图分类号 TN454 **文献标识码** A **文章编号** 1003-3106(2011)01-0044-03

Design of Coaxial Tunable Filters Based on HFSS

JIA Jian-rui, HAN Jun

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

Abstract Coaxial tunable filters are widely used in communication systems. Their design principle is introduced, and the position and size of the coupling aperture and input/output coupling loop of a filter are analyzed in detail. Using the HFSS software, a tunable filter of L band is simulated and the results show that the simulation is quite exact, indicating that HFSS can wonderfully describe the key design contents of tunable filter.

Key words filter; tunable; coupling aperture; coupling loop

0 引言

调谐滤波器既能够实现频率抗干扰又能够满足最佳收、发滤波器要求, 其通带频率能够随着工作频率要求的改变而相应改变, 在通信系统抗干扰技术中的作用举足轻重。腔体调谐滤波器设计主要存在以下 2 个难点: ① 在调谐过程中, 滤波器的响应特性和绝对带宽随着中心频率的变化而发生显著变化, 通带内插损增大, 阻带抑制度下降; ② 在调谐过程中, 中心频率随着耦合结构的变化呈非线性变化, 耦合结构难以实现。在此根据滤波器设计的基本原理, 利用 HFSS 进行预仿真, 很好地克服了上述 2 个缺点, 实现了实例设计。

1 总体设计

以 L 波段滤波器设计为例, 主要设计参数如表 1 所示。

由于所设计的调谐滤波器的调谐范围为 1 300 ~ 1 600 MHz, 为了便于照顾整个频段的相对带宽, 选择中间点 1 450 MHz 为设计频点。利用网络综合法, 选取切比雪夫函数作为逼近函数, 切比雪夫响应函数^[1]。在通带内是等波纹型的, 通带内损耗

L_{Ar} 要足够小, 取 $L_{Ar} = 0.03$ 。经查表计算确定滤波器阶数 $n = 4$, 对应的低通原型参数 g_n 可通过公式计算得: $g_0 = 1, g_1 = 0.868 1, g_2 = 1.275 4, g_3 = 1.506 2, g_4 = 0.735 1, g_5 = 1.181 0$ 。

表 1 滤波器的技术参数

技术参数	指标要求
调谐范围/MHz	1 300 ~ 1 600
1 dB 带宽/MHz	> 15
承受功率/W	50
阻带抑制度(±80 MHz)/dB	≥ 80
通带插入损耗	≤ 1
驻波系数	≤ 1.3
调谐范围/MHz	1 300 ~ 1 600

腔间耦合系数 k 及外界 Q_e 值^[2]的理论值可由式(1)和式(2)得到:

$$k_{n,n+1} = \frac{W}{\sqrt{g_n g_{n+1}}}, \quad (1)$$

$$Q_e = g_0 g_1 / W \text{ 或 } Q_e = g_n g_{n+1} / W. \quad (2)$$

式中, $W = \frac{\Delta f}{f_0}$ 为相对带宽; Δf 为绝对带宽; f_0 为中心频率。根据式(1)分别计算所确定频点一腔、二腔之间和二腔、三腔之间的耦合系数 k : $k_{12} = 0.009 831$,

收稿日期: 2010-10-18

$k_{23} = 0.007464$, 以初步确定耦合孔的大小。

根据式(1)画出整个调谐频段的耦合系数 k 的曲线, 如图 1 所示, 在后续仿真中, 为了保证在整个频段内绝对带宽不变, 要尽量使仿真曲线逼近图 1 中的理论值曲线。

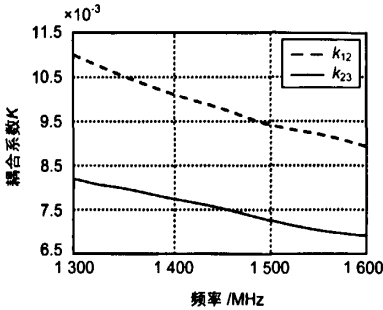


图 1 腔间耦合系数随频率变化曲线

根据式(2)计算设计频点的外界 Q_e 值: $Q_e = 109.17$, 以初步确定耦合环的位置及大小。画出整个调谐频段的 Q_e 值曲线, 如图 2 所示, 作为后续仿真中的标准。

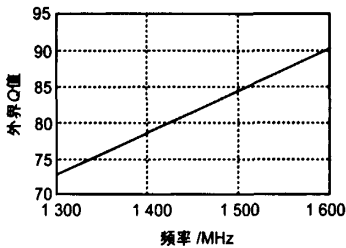


图 2 外界 Q 值随频率的变化曲线

2 微波结构设计及其仿真

2.1 腔体结构

根据工作频段低和功率容量不大以及电调滤波器的实现难易程度, 腔体选择 $\lambda/4$ 同轴腔结构, 通过改变内导体长度来改变工作频率。工作频率随着内导体长度的增加, 由高到低逐渐变化。

为了方便加工和调试, 同轴腔的结构为外腔为方形内导体为圆形, 并通过在腔内表面镀银来减小损耗增加 Q_e 值。外腔横截面为边长为 30 mm 的正方形, 当同轴腔的外、内导体直径比为 3.591 时, 同轴腔的 Q_e 值最高, 即同轴腔导体损耗最小, 为了保证高 Q_e 值和加工方便, 选择内导体直径为 10 mm。内导体顶端与腔体壁之间距离 10 mm 以上时, 产生的端电容很微弱, 对频率不会有影响, 因此腔体的高

度选择为 65 mm。

在 HFSS 中建立单谐振腔模型, 用本征模求解仿真, 仿真结果如图 3 所示。根据仿真结果可以看到, 调谐范围大致在 41 ~ 53 mm, 可覆盖 1 300 ~ 1 600 MHz, 调程约有 12 mm, 每 25 MHz 调程是 0.1 mm, 按照目前的加工情况, 能够较好地满足调谐精度。

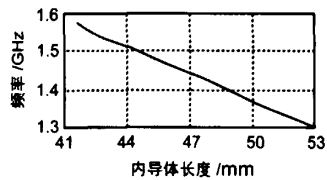


图 3 内导体与谐振频率的关系

2.2 腔间耦合结构的选择

耦合结构是整个滤波器的最关键部分。在微波腔体滤波器中, 腔间的耦合大多采用侧面上开孔进行耦合, 在以同轴腔做为谐振单元的可调滤波器中, 级间的耦合大多以腔间的侧面孔来进行耦合, 孔的形状主要是圆形和矩形。采用矩形孔作为调谐滤波器的腔间耦合结构不仅可以极大地扩大滤波器的调谐范围, 保证其通带带宽在较大的调谐范围内基本不变, 而且还可以消除大带宽滤波器中的大波纹效应。为了保证微波滤波器的调谐范围及其在调谐范围内通带宽度基本不变, 采用矩形孔作为调谐滤波器的耦合结构。

2.2.1 耦合孔位置的计算^[3]

由于设计的是宽频段调谐滤波器, 耦合孔的位置应该位于电磁场最不敏感的地方。对于矩形耦合孔, 其带宽与调谐频率的关系为:

$$\Delta f = \frac{2\sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2} f_0^2}{c(D/2)^2} M \cos^4 \frac{2\pi f_0 l}{c} \quad (3)$$

式中, c 为真空中光速; D 为同轴腔体直径; M 为孔上的磁化强度; l 为孔中心点距短路端的距离。

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{d\Delta f}{df_0} = 0, \text{ 计算得 } \frac{2\pi fl}{c} &= 0.65, \text{ 即} \\ l &= \frac{0.65c}{2\pi f} \end{aligned} \quad (4)$$

在频点 1 450 MHz, $l = 20.69$ mm。

2.2.2 耦合孔大小的计算

根据前面计算的频点的耦合系数, 可以由下面公式计算腔间耦合孔的具体大小:

$$K = \frac{32r^3}{3\pi\lambda_0 D^2 \ln b/a} (2\cos^2\theta * e^{-3.68l/2r} - \sin^2\theta * e^{-4.81l/2r}) \quad (5)$$

$$\theta = 2\pi l / \lambda_0 \quad (6)$$

式中, r 为耦合孔半径; λ_0 为工作波长; b/a 为内外导体半径之比; l 为耦合孔中心到短路端距离; D 为外导体边长; θ 为电长度。

计算一腔、二腔和二腔、三腔之间耦合孔半径分别为 7.67 mm 和 7.08 mm, 在同轴腔谐振器中, 侧面上的等面积小孔耦合近似相等, 把圆孔转化为等面积的方形孔, 并计算出其边长分别为 13.6 mm 和 12.54 mm。

2.2.3 耦合孔的仿真

按照上面计算数据, 在 HFSS 中建立 2 个相邻的谐振腔模型, 对耦合系数和频率之间的关系进行全频段仿真, 发现按照计算出的耦合孔建模, 整个频段内耦合值都达不到理论值要求, 尤其是低端相差较大。

对耦合孔的 2 个边长进行渐近优化仿真, 选择耦合值最接近理论值的孔, 优化后其仿真耦合系数曲线如图 4 所示。可以看出优化后仿真结果与理论值相比, 在低端比理论值略小, 在高端比理论值略大, 但从全频段来看, 已经和理论值曲线很接近。

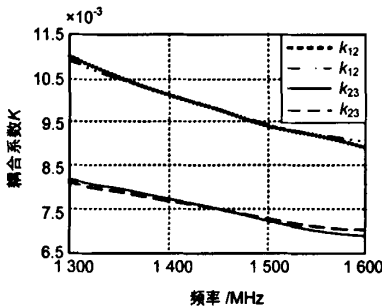


图 4 仿真耦合系数曲线

2.3 输入输出耦合结构的选择

输入、输出端的耦合形式主要是环耦合, 环的形状主要有半圆环、矩形环和三角环^[3]。矩形环耦合电抗的频率特性比半圆环平坦, 而且在频率的高端也能提供足够的耦合量, 较之三角环和不规则形状, 尺寸比较容易确定。因此选择矩形环作为输入、输出耦合结构, 其结构图如图 5 所示。

耦合环的长度 Δl 的取值一般为 $\lambda/12 \sim \lambda/6$, 选取 Δl , 利用式(7)^[3]可计算耦合环的位置 L_a 。

$$1 + \frac{2\pi\Delta l f_0}{c} \cot \frac{\pi\Delta l f_0}{c} - \frac{4\pi f_0 (L_a + \frac{\Delta l}{2})}{c} \tan \frac{2\pi f_0 (L_a + \frac{\Delta l}{2})}{c} = 0 \quad (7)$$

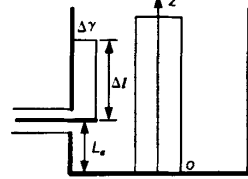


图 5 矩形耦合环结构

式中, Δl 、 $\Delta \gamma$ 和 L_a 的含义如图 5 所示; c 为真空中光速; f_0 为中心频率 (频点), 将 Δl 和 L_a 代入式(8)^[3], 可求出 $\Delta \gamma$ 。

$$\Delta f = \frac{4g_0g_1\mu_0^2c^2\ln^2\frac{a}{a-\Delta r}\sin^2\frac{\pi\Delta l}{\lambda g_0}}{RaZ_0\pi^3} * f_0\cos^2\frac{2\pi f_0}{c}(L_a + \frac{\Delta l}{2}) \quad (8)$$

式中, Z_0 为谐振腔的特性阻抗; R_a 为同轴电缆的输入电阻。由式(8)计算得 $L_a = 11$ mm, $\Delta \gamma = 2$ mm, $\Delta l = 31$ mm。

按照计算数据, 在 HFSS 中对其建模, 用激励求解整个频段内有载品质因数 Q 值, 与理论值图 2 进行对比, 仿真结果与理论值有一定误差。对耦合环优化后, 结果与理论值较吻合。

2.4 综合建模仿真

将上述确定的滤波器结构综合起来, 在 HFSS 中建立整个滤波器模型进行仿真优化。滤波器响应特性如图 6、图 7 和图 8 所示。

由图 6、图 7 和图 8 可以看出, 在低端绝对带宽比高端略微小一点, 但总体来看, 所设计滤波器能够较好地满足设计指标要求。

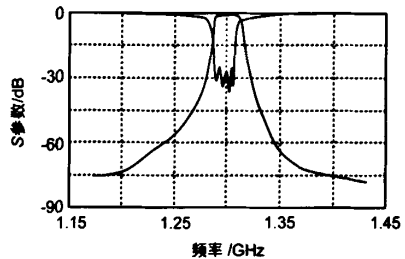


图 6 低端仿真结果

(下转第 60 页)

表 1 实验结果数据

实验次数/次	所采用算法	完成紧急任务数/个	任务时间/s
1	贪婪随机插入法	10	48 569
2	贪婪随机插入法	9	48 959
3	贪婪随机插入法	10	48 584
4	贪婪随机插入法	9	49 228
5	贪婪随机插入法	10	48 428
6	贪婪随机插入法	10	49 241
7	贪婪随机插入法	10	48 661
8	贪婪算法	9	48 855

算法运行结果对比显示,对于贪婪随机插入法保证了尽可能多的紧急任务被安排,提高了近6.7%。并且第2次、第4次和第6次试验都产生了优于贪婪算法的结果。说明加入随机化以后,避免了贪婪算法过早地陷入局部最小解的吸引域,改善了算法性能,产生更好的规划方案。同时对于贪婪随机插入法因为加入了随机性,也增加了实验结果的不稳定性,起伏波动较大,所以还需智能搜索算法的进一步优化。

3 结束语

遥感地面接收站任务规划问题是一个十分复杂的组合优化问题。通过分析问题实际约束和问题调

度目标,建立了遥感地面站任务调度问题模型。在此基础上根据贪婪算法思想,基于贪婪算法采用分治法思想和随机化思想,编程实现了基本的应模型,并将其应用于遥感数据接收方案的制定,其所得结果满足遥感数据接收多目标规划需求,能使地面接收资源得到充分的利用,很好地解决了遥感数据接收方案的优化问题。

参考文献

- [1] 郭玉华,李军,赵珂,等.多星联合任务规划中的启发式求解方法研究[J].宇航学报,2009,30(2):652-658.
- [2] 李军,王钧,陈健.基于多目标遗传算法的卫星成像任务调度技术[J].系统工程与电子技术,2007,29(7):1164-1168.
- [3] 金光,武小悦,高卫斌.卫星地面站资源优化调度模型及其启发式算法[J].系统工程和电子技术,2004,26(12):1839-1843.
- [4] 刘洋,陈英武,谭跃进.基于贪婪算法的卫星地面站任务规划方法[J].系统工程与电子技术,2003,23(10):1239-1243.
- [5] 赵静文.遥感卫星地面接收系统总体设计探讨[J].现代雷达,2004,26(7):14-16.

作者简介

张超男,(1986-),中国电子科技集团第五十四研究所信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向:卫星规划调度技术。

(上接第46页)

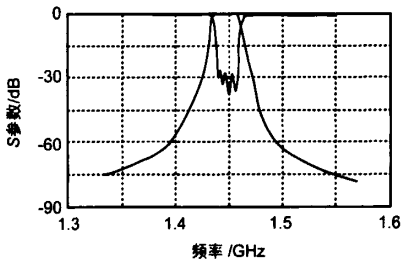


图 7 中间频段仿真结果

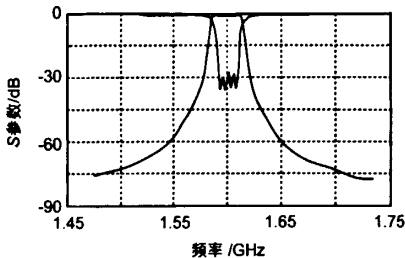


图 8 高端仿真结果

3 结束语

以传统的理论设计方法来设计同轴腔调谐滤波器,耦合结构的计算没有非常精确的计算公式,需要经过多次对实物的修改和测试才能达到设计指标,而用 HFSS 仿真软件结合设计原理的方法,以上过程只需在电脑上模拟仿真完成,最终能够精确设计调谐滤波器。该设计方法提高了设计精度,加强了设计规范,缩短了设计周期,具有很高的参考价值。

参考文献

- [1] 甘本拔,吴万春.现代微波滤波器的结构与[M].北京:科学出版社,1973.
- [2] 王清芬,马延爽.耦合系数法设计微波带通滤波器及CAD实现[J].无线电通信技术,2008,34(1):43-44.
- [3] 姚毅.宽范围调谐微波滤波器耦合结构的研究[D].成都:电子科技大学硕士论文,1993:48-49.

作者简介

贾建蕊女,(1981-),中国电子科技集团公司第五十四所研究所在读研究生。主要研究方向:微波通信。

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>