

# 一种 C 波段大功率电调滤波器设计

魏强<sup>1</sup>, 李晓东<sup>2</sup>, 王彬<sup>1</sup>, 蒋廷利<sup>1</sup>, 周雨<sup>1</sup>, 邱海莲<sup>3</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 西南大学 电子工程系, 重庆 400715;

3. 云南省机电一体化应用技术重点实验室 云南省先进制造技术研究中心, 云南 昆明 650031)

**摘要:**针对电调滤波器失谐和控制精度问题, 该文提出了一种保持恒定带宽的耦合机构设计方法, 论述了应用三维电磁场仿真软件 HFSS 协同仿真的过程, 分析了运动执行机构软硬件的关键技术, 设计了一个 C 波段、大功率(400 W)的电调滤波器。仿真和实测结果表明, 在整个调谐频段内该滤波器的带宽恒定, 驻波、抑制度和插入损耗等指标稳定良好。

**关键词:**电调滤波器; 恒定带宽; 机电一体化; 伺服系统

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.001

## Design of a C-Band High Power Electrically Tunable Filter

WEI Qiang<sup>1</sup>, LI Xiaodong<sup>2</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, JIANG Tinli<sup>1</sup>, ZHOU Yu<sup>1</sup>, QIU Hailian<sup>3</sup>

(1. The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Key Lab. of Electromechanical Integration Application Technology of Yunnan, Research Center of Advanced Manufacturing Mechnology of Yunnan, Kunming 650031, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of detuning and control accuracy in the tunable filter, a novel design method of the coupling structure with constant bandwidth is presented in this paper. The co-simulation process of using the 3D electromagnetic field simulation software HFSS is discussed, and the key software and hardware technologies of the motion actuator mechanism are analyzed. A C-band tunable filter with high power of 400 W is designed. The simulation and measured results show that the bandwidth of the filter is constant in the whole tunable band is nearly constant, and the specifications of the standing wave, suppression and insertion loss are stable and good.

**Key words:** electrically tunable filter; constant bandwidth; electromechanical integration; servo system

## 0 引言

现代武器系统面临的电磁环境日趋拥挤、异常复杂, 频率捷变是电子抗干扰最主要的技术手段, 电调滤波器是实现抗干扰微波系统的重要部件<sup>[1-2]</sup>。

综合文献[3-4]分析, 对于 U/V/L 频段的电调滤波器报道较多, 而对于 C 波段和更高频段的电调滤波器报道较少。

目前电调滤波器设计存在的难点有:

1) 滤波器失谐问题<sup>[5-7]</sup>。如何解决滤波器相对带宽随频率变化而发生显著变化的问题。

2) 伺服机构控制精度问题<sup>[8]</sup>。如何解决运动机构微行程、高精度、重复性的问题。

在工程应用中, 还需解决温度、振动冲击等多种

因素造成的频率漂移、误差问题。

本文介绍了一种恒定带宽耦合机构和运动执行机构的设计方法, 并在此基础上完成了一款大功率 C 波段电调滤波器的研制, 实测结果和理论仿真吻合, 满足工程所需。

## 1 电调滤波器设计

电调滤波器的频率为 4 400~5 000 MHz, 带宽 $\geq 40$  MHz, 插入损耗 $\leq 1$  dB, ( $f_0 \pm 100$  MHz) ( $f_0$  为中心频率) 带外抑制 $\geq 50$  dBc, 承受功率 $\geq 400$  W, 调频步进为 10 MHz。高带外抑制和大功率是本滤波器的设计难点。

C 波段电调滤波器有波导、同轴腔、钇铁石榴石(YIG)磁调 3 种实现方式<sup>[9]</sup>。YIG 磁调滤波器性能

收稿日期: 2018-05-28

作者简介: 魏强(1971-), 男, 重庆人, 研究员, 硕士, 主要从事微波无源器件和信号处理器件设计的研究。E-mail: weiqiang\_cq@aliyun.com.

优良,但其耐功率低。

技术指标要求调谐频率为 4 400~5 000 MHz, 对应波长变化 0.82 mm。若采用 λ/4(λ 为自由空间波长)同轴腔,调谐行程为 0.2 mm。若采用 BJ48 波导谐振腔,通过调谐销钉从波导 H 面插入,仿真计算,采用直径为 ∅10 mm 的调谐销钉,其调谐行程为 27 mm,可覆盖的频率为 4.3~5.1 GHz。与同轴腔方案相比,从调谐精度上看,波导的调谐行程较长,调谐精度低,易工程实现。

此外,波导滤波器的峰值功率容量(介质为空气)为

$$P = \frac{abE^2}{480\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (1)$$

式中:a、b 分别为矩形波导截面长和宽;E 为空气击穿电场强度。由式(1)可估算 BJ48 波导谐振腔的最大功率容量为 467 kW,远大于相同尺寸同轴腔的承受功率。

采用 KQ 变换法<sup>[10]</sup>,四阶切比雪夫滤波器低通原型参数为  $g_0 = 0.7128, g_1 = 1.2003, g_2 = 1.3212, g_3 = 0.6476, g_4 = 1.1007$ 。通过网络变换,实现此滤波器的拓扑结构如图 1 所示。

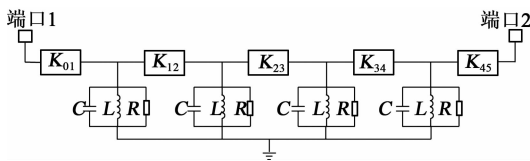


图 1 滤波器网络拓扑结构原理图

图 1 中,各个腔间耦合系数  $K_{ij}$ 、谐振回路中的电感 L、电容 C、电阻 R 分别为

$$K_{ij} = \frac{BW}{f_0 \sqrt{g_i g_j}} \quad (2)$$

$$L = C = \frac{1}{2\pi f_0} \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{Q_0} \quad (4)$$

式中:BW 为滤波器的绝对带宽;  $Q_0$  为谐振回路的品质因数。采用从图 1 求出的耦合系数  $K_{ij}$  作为耦合结构仿真理论值。

### 1.1 腔间耦合结构设计

由式(2)可见,当腔间耦合系数  $K_{ij}$  为定值时,随着频率的升高,BW 也应增大。理想的电调滤波器需要设计一种耦合结构,在整个调谐频率范围内,保持 BW 为定值的条件下,使  $K_{ij}$  与中心频率  $f_0$  的变化成反比,即要求  $K_{ij}$  随  $f_0$  的升高而降低,才能达到带宽恒定的目标。

物理结构耦合系数  $K_{sim}$  可以利用本征值计算公式求得,即

$$K_{sim} = \frac{(f_2 - f_1)}{\sqrt{f_2 f_1}} \quad (5)$$

式中  $f_1, f_2$  为软件求得的 2 个本征模频率值。

定义  $K_{ij}$  与  $K_{sim}$  之差的绝对值为  $\Delta K$ ,则有  $\Delta K = |K_{ij} - K_{sim}|$  (6)

通过给定的恒定滤波器带宽 BW 来确定  $K_{ij}$  为频率的函数,即  $K_{ij}(f)$ ,并以式(6)作为目标函数,寻找合适的物理耦合结构,使  $\Delta K$  恒趋近于 0,解决失谐问题。

E 面金属膜片滤波器是由在矩形波导宽边插入与 E 面平行的金属膜片和矩形波导共同构成,金属膜片起耦合作用,相邻膜片间构成谐振腔。通过改变这些金属膜片高度或宽度,实现集总元件(电容或电感),图 2 为在矩形波导中插入电容、电感膜片的物理结构及其等效电路。图中,δ 为膜片的厚度,B 为电导, $Y_0$  为输出导纳。

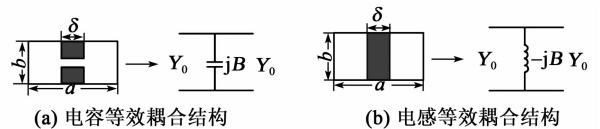


图 2 波导滤波器电容、电感等效耦合结构

传统 E 面波导滤波器耦合结构通常只采用单一的电感或电容膜片,膜片厚度、位置偏置结构参数与滤波器的中心频率、通带带宽有密切的联系<sup>[11]</sup>,不能够实现宽范围调谐。

通过分析 E 面波导滤波器耦合理论和仿真计算,最终选定的腔间耦合结构如图 3 所示,这种耦合结构由全高电感膜片和半高电容膜片共同构成,满足式(6)要求,确定耦合结构尺寸的初值。

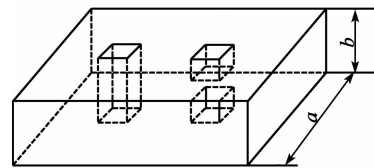


图 3 恒定带宽混合耦合结构

### 1.2 滤波器设计

滤波器由耦合结构和谐振腔级联而成,如图 4 所示。



图 4 波导滤波器结构剖分

将滤波器拆分为耦合结构参数仿真、谐振器长度仿真、滤波器整体仿真 3 个步骤。

1) 耦合结构参数仿真。按照图 3 所示结构建模, 仿真其在中心频率 4.7 GHz 处的传输系数  $S_{12}$  值, 直到其  $S_{12}$  的仿真结果与理论数据相符, 求出耦合结构的初值。

2) 谐振器腔体长度仿真。根据耦合结构的尺

寸建立谐振器模型, 调整谐振器的长度, 使单腔谐振器的谐振频率与所要求的滤波器通带中心频率一致, 即可以算出谐振器的长度。

3) 滤波器整体仿真。把所有的耦合结构和谐振器结构交替级联起来(见图 5), 利用场路结合、协同仿真<sup>[12]</sup>的方法, 对滤波器进行整体仿真优化, 完成滤波器设计。

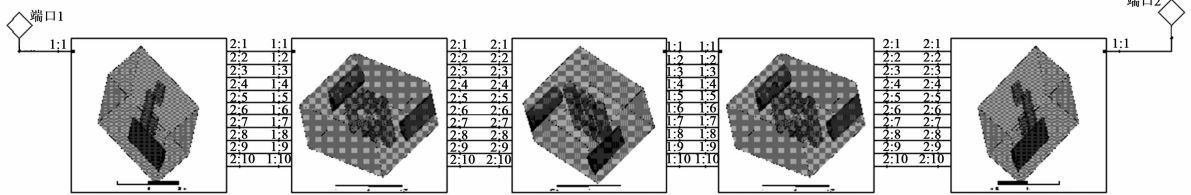


图 5 波导滤波器协同仿真

图 6 为波导滤波器仿真频响。仿真优化结果表明, 在 4.4 GHz、4.7 GHz、5 GHz 3 个频点, 带宽分别为 47 MHz、43 MHz、45 MHz, 偏离中心频率 100 MHz, 抑制度分别为 55 dB、65 dB、65 dB, 在整个调谐频段内带宽变化  $\leq 5$  MHz, 驻波、抑制等指标满足要求。

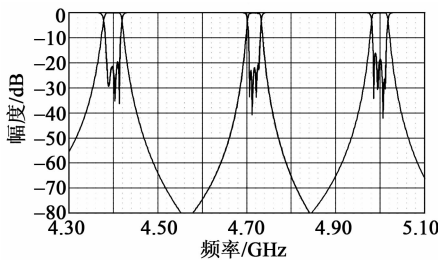


图 6 波导滤波器仿真频响

## 2 执行机构软硬件设计

### 2.1 执行机构硬件设计

为满足设计指标, 要求电调滤波器伺服机构位置控制灵活, 响应快, 定位准确。直流伺服系统存在维护费高, 堵转易烧毁及控制复杂等问题。交流伺服系统维护性低, 控制技术成熟, 但成本较高。步进电机伺服系统有可靠性高、性价比高、便于计算机控制等优点。因此, 采用步进电机作为执行机构硬件首选。

通过理论仿真, 得到调谐螺钉行程和频率关系, 即频率变化 10 MHz, 调谐活塞变化 0.45 mm, 且在调谐范围内, 二者近似为线性关系。因此, 除对运动部件的加工精度有较高要求外, 还需合理设计执行机构才能满足要求。图 7 为执行机构运动控制系统硬件组成<sup>[13]</sup>。

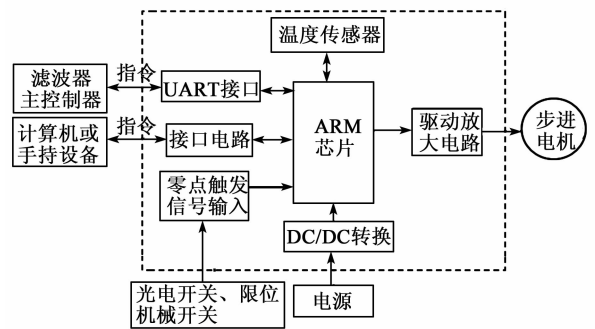


图 7 控制板硬件构成

主控单元通过 UART 数据接口向伺服控制系统单片机发送频率相关的配置信息, 经过处理将频率值转化成步进电机运动参数, 控制执行机构运动到相应位置, 从而实现选频功能。驱动放大器驱动步进电机电动作。机械限位开关限制内导体的运动范围, 而光电开关确定内导体的运动零点位置。滤波器腔体和运动机构为机械结构件, 性能的调整只能依靠存储的数据, 而温度环境的变化会改变滤波器性能, 因此在运动控制系统中增加了温度补偿, 使温度变化引起的频漂得到抑制, 提高了系统的精度, 也增加了系统的环境适应性。主控单元实物如图 8 所示。

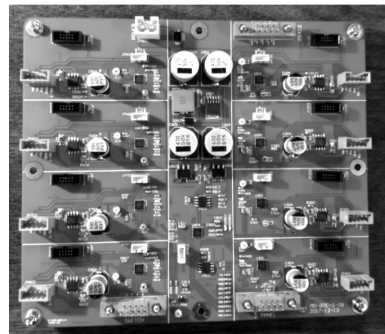


图 8 控制板实物

运动机构零点决定了整个滤波器的控制精度。零点的确定采用了初零、细零和步进电机机械零点三级控制方法,实现了执行机构运动零点的唯一性,提高了滤波器的准确度。当调谐杆经过机械零点时,零点位置触发电路将输出脉冲信号,处理器接收到该脉冲信号,然后从该机械零点开始计数,直到调谐杆运动到指定步数,电机停止,调谐完成。从零点位置开始到指定位置,要经3个阶段:

- 1) 低速寻找零点。寻找机械零点时,电机转速低,寻找起始位置零点。
- 2) 恒定速度运行。为提高系统响应速度,必须在较短时间内运动到指定位置,所以,从零点开始加速到最高速度后,以最高速度运行一定距离。
- 3) 以低速运动到指定位置。当调谐杆运动至指定位置前必须减速,以防过冲,降低控制精度。

### 2.2 执行机构软件设计

运动控制系统的控制策略和控制方法都是通过软件实现的,要达到理想的运动控制效果,控制软件的设计至关重要。滤波器控制软件由初始化函数、运动函数、复位函数组成,程序框图如图9所示<sup>[13]</sup>。

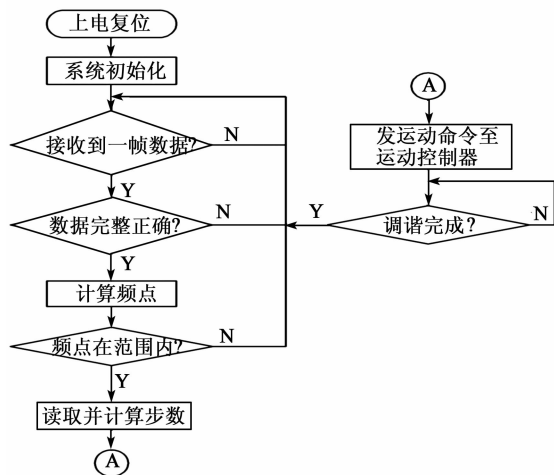


图9 滤波器控制软件流程图

当系统上电复位后,对系统各部分进行初始化,然后等待上位机发送调谐指令。当接收到一条完整的调谐指令后,根据协议计算出频点,如果频点在规定的范围内,读取存储器中该频点所对应的步数。存储器中只存放了频点为整数兆赫兹所对应的步数,当频点为非整数兆赫兹时,采用线性插值算法,根据前、后频点的步数计算出频点所对应的步数。当电机运动结束,调谐完成,等待下一次调谐指令。

### 3 实验结果

根据上述设计思路,对电调滤波器进行了实物加工,使用Agilent E5071C网络分析仪进行测试。在室温25℃下实测结果如图10所示,3组曲线分别对应 $f_0$ 为4 400 MHz、4 700 MHz、5 000 MHz时的频响、驻波特性。在整个调谐过程中,3 dB带宽 $\geq 40$  MHz,插损 $\leq 0.6$  dB,驻波 $\leq 1.5$ 。

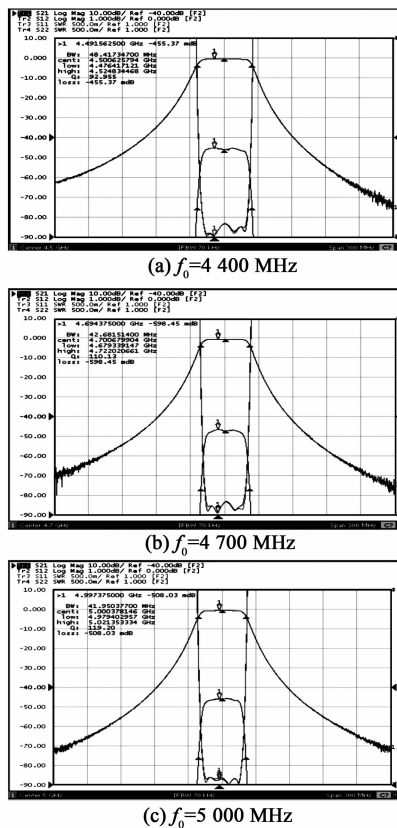


图10 滤波器实测频响

由图10可知,在整个调谐范围内,滤波器的响应形状和相对带宽保持不变,较好地满足了工程实际需要。

### 4 结束语

本文研制的电调滤波器具有恒定带宽、承受功率大的特点,在系统应用中性能稳定,已批量生产。通过滤波器和伺服传动机构的机电一体化设计,研制结构更紧凑的大功率电调滤波器满足通信设备高集成、小型化的要求,具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

[1] 魏强,王彬,唐京洲.一种大功率窄带电调滤波器设计[J].电声技术,2013,53(5):640-644.  
WEI Qiang, WANG Bin, TANG Jingzhou. Design of

- a high power capacity and narrow bandwidth electrically tunable filter[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(5): 640-644.
- [2] 鞠瑞林. 机动式指挥系统方舱多电台同址抗干扰设计[J]. 指挥信息系统与技术, 2012, 3(2): 54-57  
JU Ruilin. Multi-radio co-site anti-interference design for mobile command and control shelter[J]. Command Information System and Technology, 2012, 3(2): 54-57.
- [3] 周水杉, 章莉. 可调滤波器的应用和发展[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(9): 92-96.  
ZHOU Shuishan, ZHANG Li. Application and development of tunable filters[J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(9): 92-96.
- [4] 林逸群, 刘茉莉, 卢胜军. 宽带接收机应用的超宽倍频程电调滤波器设计[J]. 微波学报, 2015, 31(2): 59-62.  
LIN Yiqun, LIU Moli, LU Shengjun. Design of ultra octave tunable filter for wide band receiver applications[J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(2): 59-62.
- [5] 吴恒恒, 张忠海, 官伯然. 平衡腔体滤波器高低端带宽的耦合环研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2009, 29(3): 32-35.  
WU Hengheng, ZHANG Zhonghai, GUAN Boran. A study on novel design of coupling hoops of balancing bandwidth use in cavity filters[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2009, 29(3): 32-35.
- [6] 贾建蕊, 马延爽, 张英. 一种恒定带宽可调滤波器的设计[J]. 无线电工程, 2015, 45(9): 45-48.  
JIA Jianrui, MA Yanshuang, ZHANG Ying. Design of a tunable filter with constant bandwidth[J]. Radio Engineering, 2015, 45(9): 45-48.
- [7] 李晓, 李山. 模糊 PI 控制的三相四桥臂有源电力滤波器[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017(5): 148-155.  
LI Xiao, LI Shan. Three-phase four-leg active power filter based on fuzzy PI controller [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017(5): 148-155.
- [8] 胡娟, 王清芬, 王焯. 一种可调滤波器的设计技术[J]. 无线电工程, 2015, 45(4): 53-55  
HU Juan, WANG Qingfen, WANG Ye. Design on a tunable filter[J]. Radio Engineering, 2015, 45(4): 53-55.
- [9] 张平川, 谷明喜, 刘进. YIG 调谐带通滤波器相位一致性设计[J]. 磁性材料及器件, 2013, 44(5): 28-31.  
ZHANG Pingchuan, GU Mingxi, LIU Jin. Design on phase consistency of YIG-tuned bandpass filter [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2013, 44(5): 28-31.
- [10] CAMERON R J, KUDSIA C M, MANSOUR R R. 通信系统微波滤波器—基础、设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [11] 柳浩, 李胜先. 一种新型双模波导滤波器的设计[J]. 电子设计工程, 2016, 24(21): 135-137.  
LIU Hao, LI Shengxian. Design of a novel dual mode waveguide filter [J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(21): 135-137.
- [12] 魏强, 赵雪梅, 梁宇. 应用 Designer 和 HFSS 对微波滤波器的协同仿真[J]. 压电与声光, 2009, 31(1): 5-8.  
WEI Qiang, ZHAO Xuemei, LIANG Yu. Cosimulation of microwave filter with designer circuit and HFSS software[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(1): 5-8.
- [13] 段宝岩. 电子装备机电耦合理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

欢迎订阅《压电与声光》杂志