文章编号:1004-2474(2018)03-0326-05

低频段高抗振大功率滤波器的小型化设计

王 彬,魏 强,蒋廷利

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:该文设计了一款电容加载结构的小型化腔体滤波器。谐振器端头采用圆盘结构的电容加载,并使用 四氟乙烯材料在谐振杆中间位置进行支撑加固;计算过程中,为三维电磁模型添加了集总端口,与电路模型联合仿 真进行参数优化。通过三维电磁环境下的功率容量分析,该滤波器满足大功率指标要求。

关键词:电容加载;高抗振;大功率;联合仿真;寄生通带抑制

中图分类号:TN384 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.005

Miniaturization Design of Low Frequency Band Filter With High Anti-vibration and High Power

WANG Bin, WEI Qiang, JIANG Tingli

(The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China) **Abstract:** A compact cavity filter with capacity-loaded structure is designed in this paper. A disc shape end of the resonator is adopted to realize capacity-loading, and Teflon support structure is used to reinforce the resonant post. In the calculation process, the lumped ports are added into the 3D electromagnetism model, and then the cosimulation with circuit model can optimize parameters more efficient. The power capacity analysis is carried out under 3D electromagnetic environment, and the results show that the filter meets the requirements of high power index.

Key words: capacity-loaded; high anti-vibration; high-power; co-simulation; spurious pass-band suppression

0 引言

远距离微波散射通信系统中,收发端腔体滤波 器需满足低损耗、高耐受功率的性能要求^[1-2],但其 面临着小型化、快速仿真计算、抗振结构设计等技术 难点。小型化是腔体滤波器当前的重要研究方向, 主要通过电容加载的方式缩小滤波器体积^[3-5]。由 于设计过程中需要三维电磁仿真,耗时较长,近年来 快速设计方法也成为热门研究方向^[6]。在低频段的 腔体滤波器体积较大,常采用异形的电容加载谐振 器结构,该类型谐振器一般呈悬臂结构,且端头较 重,抗振能力较差^[7-8]。

本文设计的交指腔体滤波器,采用圆盘结构电容加载减小谐振器长度,从而实现了滤波器体积小型化。为了减少设计过程中的仿真计算时间,采用 场路结合的联合仿真方法,将三维电磁仿真结果导 入电路模型进行参数优化,缩短研制周期,提高了仿 真计算效率。为了改善滤波器抗冲击振动能力,通 过在谐振杆适当位置增加四氟乙烯支撑块,减少谐 振杆在振动环境下的摆动幅度,改善了滤波器抗振 能力,并通过了相应的环境试验验证。

1 滤波器方案选择

本文设计的滤波器指标:P波段 15%带宽;通带 损耗≪0.5 dB;带外抑制:≥60 dB@DC~150 MHz & 320 MHz~3 GHz,可承受功率大于1 kW。

由上述指标分析,其他结构的滤波器,如 LC 滤 波器、介质滤波器、声表面波滤波器等,在 P 波段体 积小,但损耗和功率容量难以达到指标要求,微带滤 波器无法达到高带外抑制、低损耗的要求。

根据《现代微波滤波器结构与设计》^[9]理论,选 择交指结构来实现这类中等带宽的腔体滤波器。该 结构滤波器由 TEM 模(即横电磁波模式)谐振器构 成,每个谐振元件在中心频率处约为 λ/4(λ 为波 长),一端短路,另一端开路。谐振器间的耦合由谐 振元件之间的边缘场完成。

收稿日期:2017-11-14

作者简介:王彬(1984-),男,重庆人,工程师,硕士,主要从事微波无源器件的研究。E-mail:wb3366@126.com。

通过微波滤波器设计理论,计算出截止频率处 对应低通原型的归一化频率:

$$\left|\frac{\omega}{\omega_{c}}\right| = \frac{1}{\overline{BW}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0}} - \frac{\omega_{0}}{\omega}\right) \tag{1}$$

式中: ω 为滤波器频率; ω。为截止频率; ω。为中心频 率; BW 为相对带宽。根据带外抑制要求, 参考契比 雪夫滤波器特性, 查表得出本文设计的滤波器应不 小于六阶。

由于体积的要求,选择通过在谐振器开路端圆 盘电容加载结构^[10],使谐振器长度小于 λ/4 的理论 值,实现滤波器体积小型化。

2 滤波器仿真设计

2.1 滤波器结构仿真

通过原型滤波器查表,由下式得到腔体滤波器的相对带宽($\Delta\omega$)、耦合系数(K_{ij})、边腔群延时(t_1)等参数:

$$\Delta \omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\sqrt{\omega_2 \times \omega_1}} \tag{2}$$

$$K_{ij} = \frac{\Delta\omega}{\sqrt{g_{i}g_{j}}} \tag{3}$$

$$t_1 = \frac{2g_0g_1}{\pi \times (\omega_2 - \omega_1)} \tag{4}$$

式中: ω_1 和 ω_2 为滤波器的通带边沿频率; g_i 、 g_j 为原型滤波器值。通过式(4)可得 t_1 =12.4356 ns。表1 为原型滤波器值,表2为耦合系数值。

表	1	原	型	淲	波	器	值
~~~	*	1/1	Ŧ	110	1/~	·μμ-	LEL.

$g_0$	$g_1$		$g_2$	$g_3$				
1	0.781	3 1.	360 0	1.6897				
$g_4$	$g_5$		$g_6$	$g_7$				
1.535 0	1.497	0 0.	709 8	1.100 7				
表 2 耦合系数值								
$K_{12}$	$K_{23}$	$K_{34}$	$K_{45}$	$K_{56}$				
0.161 68	0.109 95	0.103 49	0.109 95	0.161 68				

通过以上计算参数,在电磁仿真软件中建立输入 谐振腔的单腔三维模型。通过选取合适的抽头线高 度,使群时延中心位于通带中心频率处,峰值满足第一 级群时延值 t₁^[11]。三维模型及计算结果如图1所示。





图 1 滤波器输入腔仿真模型及曲线

建立两个相邻谐振器的三维仿真模型,如图 2 所示。经过本征模仿真计算,由电磁仿真软件中的 后处理模块得出谐振器间的耦合系数。通过调整谐 振器间距,得到不同谐振器间的耦合系数。



图 2 滤波器相邻谐振器仿真模型

根据图 1、2 所示结构分析计算出的各参数值, 建立滤波器整体模型,如图 3 所示。由于计算输入 群时延及谐振杆间耦合量时,未考虑周边的谐振柱 及空气腔引起的电磁微扰,因此,建立整体模型后, 还需对各尺寸参数进行优化。



图 3 滤波器仿真模型

由于滤波器整体模型结构复杂,尺寸较大,三维 电磁仿真计算时,需要进行大量的网格剖分,耗时较 长,优化效率低。为提高参数优化效率,本文采用场 路结合的联合仿真方法,缩短滤波器优化的时间。

为了将电磁仿真模型导入电路模型辅助计算, 在三维电磁模型中每个谐振器的端头圆盘处添加1 个集总端口,形成带有2个波端口、6个集总端口的 三维模型,三维模型中集总端口设置如图4所示。



图 4 谐振器模型添加集总端口

三维电磁仿真计算完成后,通过模块导入的方 式将计算结果导入电路模型,导入后的完整电路模 型如图 5 所示。电路模型中的端口 1、2 分别连接电 磁模型中的输入、输出波端口,端口 3~8 分别对应 各谐振器所添加的集总端口。各谐振器分别与集总 电容连接后再接地,图 5 中的 clp~c3p 为接入到谐 振器端口的集总电容,针对谐振器与外壳接地之间 的电容进行微调。仿真优化后,将原本只能通过电 磁仿真的计算结果,通过电路仿真进行优化拟合,从 而减少了仿真计算时间。

图 5 电路仿真模型

根据电路模型中的计算结果和所需的电容值,反 馈到三维模型中对谐振杆长度等参数进行调节。如 果电容值为正,则需增加谐振杆长度;若电容值为负, 则需减少谐振杆长度。最终滤波器 S 参数仿真结果 如图 6 所示。以上通过三维电磁仿真计算与电路模 型参数优化相结合的方法,达到了快速设计的目的。



#### 2.2 滤波器抗振设计

本文中滤波器采用电容加载结构。谐振杆直径 Ø7 mm、长约 156 mm;谐振柱端头设计成直径 Ø34 mm的加载圆盘,以达到增大加载面积,减少谐 振杆长度的目的。谐振杆单端固定在滤波器壳体上。

由于单个谐振单元质量为 70 g,冲击振动环境 下,谐振柱端头易发生较大幅度的摆动,严重影响滤 波器电性能,甚至可能由于应力导致谐振杆弯曲 断裂。

为提高滤波器的抗振性,在谐振器靠近自由端 一侧,设计了四氟乙烯支撑结构,使滤波器具有良好 的抗振动冲击能力,其结构和安装位置见图 3。 滤波器整体结构设计中,每个谐振杆都采用支 撑块进行加固。在相同振动条件下,未加支撑块的 谐振柱力学仿真模型分析如图7所示。如果不增加 四氟乙烯支撑柱结构,谐振柱加载圆盘形变量约为 2.5 mm,易造成谐振柱低端连接处断裂,同时还易 导致输入、输出端相邻的谐振柱引线断裂,导致滤波 器失效,产生严重后果。



#### 图 7 未加支撑块的谐振柱力学仿真

通过仿真优化,加支撑块后谐振柱力学仿真模型分析如图 8 所示。选择在距离谐振柱底部安装面 120 mm 的位置安装四氟乙烯支撑块,力学仿真结 果得出圆盘形变量减少到约 0.05 mm,减少了冲击 造成的谐振柱形变,从而提高了滤波器的结构可 靠性。



图 8 加支撑块后谐振柱力学仿真

随后加工的滤波器实物产品,按照 GJB360B 方法 214 条件 I-B 进行随机振动试验,并顺利通过该试验验证,证明了本文设计的滤波器结构具有较高的抗冲击振动能力。

## 2.3 滤波器功率容量分析

滤波器需满足功率容量大于1 kW 的指标要求。在电路仿真软件中建立滤波器的等效电路模型,如图9所示,输入功率设置为单位功率1 W。计算得出各谐振腔的节点电压值,利用下式得出储能最大的谐振单元^[12]:



式中:W为谐振腔储能值;V为节点电压值(此电压 为与频率相关的复数);f为频率。

图 10 为各谐振腔储能曲线。由图可看出,第 3 个谐振腔的储能最大,中心频率处储能 $W_3 = 9.1$  nJ。



图 10 谐振节点储能计算结果

在三维电磁仿真软件中建立第3谐振腔的单腔 模型,并进行本振模求解。计算完成后,通过编译程 序^[13],使用场计算器计算出谐振腔储能 $W_{av} = 2.4 \times 10^{-18}$  J。图 11 为计算界面及结果。



图 11 谐振腔储能计算结果

根据储能 W_{av}得到归一化系数 N₁:

 $N_1 = \text{sqrt}(1 \text{ nJ}/W_{av}) = 20 \text{ 418}$  (6)

将归一化系数带入 HFSS 场计算中,得到归一 化最大电场 *E*_{max}=16 656 V/m,如图 12 所示。



通过仿真分析可看出,本文设计的滤波器具有 较大的功率容量,最大可承受2095 W峰值功率,满 足1kW的功率指标要求。

#### 2.4 滤波器寄生通带分析

滤波器远端带外抑制要求在 0.32~3.00 GHz 范围的谐波抑制在 60 dB 以上。

由于滤波器采用 1/4 波长结构,在4 倍频、8 倍 频和 16 倍频附近有较强的寄生通带,这些寄生通带 均位于 0.32~3.00 GHz,仿真结果如图 13 所示。



图 13 滤波器未采用谐波抑制仿真结果

为了提高 0.32~3.00 GHz 内的带外抑制指标,在腔体内部的输入接头处,级联了一个大功率 LC 低通滤波器,对远端的谐波起到了很好的抑制 作用,达到了系统带外抑制的指标要求。图 14 为级 联低通滤波器后的仿真结果。



在抽头内部级联 LC 后,对滤波器驻波影响较 大。为平衡级联对滤波器驻波带来的影响,通过对 抽头在第一级谐振柱上的焊点位置进行微调改变耦 合量,同时对第一级谐振柱频率微调,很好地解决了 级联对性能的影响。测试结果如图 15 所示,实测性 能与仿真结果对比,一致性较好,达到了远寄生通带 的设计要求。



# 3 测试结果

根据三维仿真设计模型,对各结构进行加工和 组装调试。谐振器采用电容加载后,结构较复杂,机 加难度大。通过对加载圆盘单独加工后再焊接在谐 振杆上的方法,独立完成每个谐振单元的加工和组 装。将四氟乙烯支撑模块套在谐振杆指定位置上, 再由螺钉将谐振杆固定于滤波器壳体壁上。

加工完成后的滤波器照片如图 16 所示,外形尺 寸为 220 mm×170 mm×58 mm。图 17 为滤波器 的实测曲线,通带插损小于 0.5 dB,带内幅度波动 小于 0.2 dB,通带内驻波小于 1.5,150 MHz 以下 带外抑制大于 70 dB。图 15 中,320 MHz~3 GHz 的带外抑制达到 70 dB,满足各项指标要求。



图 16 滤波器加工实物图



4 结束语

本文设计了一款工作于 P 波段的小型化交指 腔体滤波器,设计过程中,将三维电磁仿真结果代入

(上接第 325 页)

### 3 结束语

本文提出了一种"瓦片式"T/R 组件的工艺设 计方案,并针对该 T/R 组件中的关键工艺进行了分 析。该 T/R 组件的中心频率为 16 GHz,尺寸为 37 mm×37 mm×20 mm,质量小于 40 g,与传统 T/R 相比,其体积质量减小 60%,产品更可靠。

# 参考文献:

[1] GREGORWICH W. Conformal airbome arrays [C]//

电路模型联合仿真,减少了仿真计算时间,缩短了研 制周期;对设计模型进行功率容量分析,本结构的腔 体滤波器具有很高的耐受功率;通过增加四氟乙烯 支撑结构,对谐振杆进行了加固,使滤波器具有较高 的抗振能力。实物产品测试结果表明,该滤波器插 损小、带外抑制高、功率容量大、寄生通带抑制远。 产品已实现批量供货,能很好地满足工程应用需求。

### 参考文献:

- [1] 李健. 腔体带通滤波器的设计与实现研究[D]. 合肥: 安徽大学,2016.
- [2] 范仁钰,杨青慧,张怀武.宽带同轴腔体滤波器的设计
  [J]. 压电与声光,2016,38(2):253-256.
  FAN Renyu, YANG Qinghui, ZHANG Huaiwu. Design of broadband coaxial cavity filter[J]. Piezoelectrics
  & Acoustooptics,2016,38(2):253-256.
- [3] 汤艳燕,卢晓鹏,张玉梅.P波段腔体滤波器的小型化 设计[J].雷达科学与技术,2016,14(3):329-332.
- [4] 赖真豪. 微波滤波器的小型化研究[D]. 成都:电子科 技大学,2014.
- [5] 梁骏.小型化电容加载腔体滤波器设计[J].电子设计 工程,2012,20(24):71-78.
- [6] 张强,张贞鹏,李伟. 同轴腔体窄带带通滤波器快速设 计方法[J]. 舰船电子对抗,2013,36(4):95-100.
- [7] 朱小三.低频段腔体滤波器的小型化处理方式分析 [J].工程技术,2016(72):296.
- [8] 胡国高.一种腔体滤波器悬臂螺旋振子的抗冲振优化 设计[J].电讯技术,2012,52(4):586-590.
- [9] 甘本祓,吴万春.现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京:科学出版社,1973.
- [10] WANG Ying, YU Ming. Inline cross-coupled coaxial cavity filters[J]. IEEE Transitions on MTT, 2009, 57 (12):2958-2965.
- [11] NESS J B. A unified approach to the design, measurement, and tuning of coupled-resonator filters[J]. IEEE Transitions on MTT, 1998, 46(4): 343-351.
- [12] 冯文文,李磊,王惠生.星载腔体滤波器功率容量分析 [J].电子技术,2014,32(5):33-35.
- [13] HAGENSEN M, EDQUIST A. Simplified power handling analysis of microwave filters [J]. Microwaves Journal, 2012, 55(9):130-141.

Aspen: Proceedings of IEEE Aerospace Conference, IEEE, 1997.

- [2] ADOLPH M, HACKENBERG U, REBER R, et al. High-precision temperature drift compensated T/Rmodule for satellite based SAR applications[J]. European Microwave Conference Proceedings, 2005: 813-816.
- [3] SCHUH P, LEBERER R, SLEDZIK H, et al. Advanced high power amplifier chain for X-band T/Rmodules based on GaN MMICS[J]. European Microwave Conference Proceedings, 2006;241-244.