

# 小型化 Ku 波段带通滤波器的设计

魏 强, 邓学文, 唐小艳, 唐京洲

(四川压电与声光技术研究所, 重庆 400060)

**摘要:** 介绍了一种 Ku 频段带通滤波器的设计方法, 采用电磁仿真软件和 Matlab 软件给出了滤波器的物理结构和仿真结果, 同时给出一个滤波器的设计实例和测试结果。利用制作简单的圆棒内导体结构, 采用梳状线与同轴腔相结合的方式, 实现窄带带通滤波器, 达到结构紧凑, 性能优良的特点。设计实例证明了方法的有效性。

**关键词:** 带通滤波器; 梳状滤波器; 耦合矩阵

中图分类号: TN65 文献标识码: A

## Design of Minuature Ku Band Band-pass Filter

WEI Qiang, DENG Xue-wen, TANG Xiao-yan, TANG Jin-zhou

(Sichuan Institute of Piezoelectric & Acousto-optic Technology, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** This paper introduces a design method of Ku band microwave band pass filter. With the aid of EM simulation software and Matlab software, the physical structure and simulation results was given. Filter design example and test result was also provided. With the simple inner conductor rod structure, narrowband band pass filter was implemented by combining combline with coaxial cavity. This filter was compact in structure and excellence in performance. The example verified the validity of the method.

**Key words:** band pass filter; combline filter; coupling matrix

在许多通信设备中, 对滤波器尺寸的要求越来越高, 即迫切要求研制小型化、高性能的微波滤波器。通常, Ku 波段的带通滤波器都采用波导形式, 具有插损小, 品质因数  $Q$  值高的优点, 但外形尺寸大, 不易直接集成在收发信机中。微带线发夹滤波器虽然体积较小, 但插损大, 抑制度低。因此, 根据使用要求, 本文设计了一种基于同轴梳状线结构的 Ku 波段带通滤波器, 结构紧凑, 性能指标好, 可方便地与电路安装制作在一起。本文作者通过网络综合的方法将滤波器的技术指标转化为耦合矩阵。并采用合适的结构实现耦合矩阵的各个单元, 完成滤波器的设计。

## 1 理论分析

### 1.1 梳状滤波器设计原理

梳状线带通滤波器是一种能得到宽阻带的带通结构, 由数个 TEM 模谐振器间直接耦合的平行耦合线阵列构成。各相邻谐振器的同一端均被短路, 而另一端经过一集总电容  $C_s$  接地。在此滤波器中, 谐振器间的耦合由平行耦合线间的边缘场得到<sup>[1-2]</sup>。

梳状线滤波器的各谐振器顶端的集总电容  $C_s$  很大, 以使谐振线长度更短和滤波器很小, 同时使滤

波器的寄生通带离中心频率更远, 从而具有更好的阻带特性。

### 1.2 广义切比雪夫多项式逼近

任意的二端口无耗滤波器网络都是由一系列相互耦合的  $N$  级谐振器所组成, 其传输和反射函数都可表示为  $N$  阶多项式, 即

$$\begin{cases} S_{11}(\omega) = \frac{F_N(\omega)}{E_N(\omega)} \\ S_{21}(\omega) = \frac{P_N(\omega)}{\epsilon E_N(\omega)} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\epsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{RL/10} - 1}} \cdot \frac{P_N(\omega)}{F_N(\omega)} \Big|_{\omega=1}$ ,  $RL$  为回波损耗。

$S_{11}$  和  $S_{21}$  具有相同的多项式  $E_N(\omega)$ , 多项式  $P_N(\omega)$  包含了传输函数的传输零点。

作为无耗网络, 满足能量守恒原理, 可得

$$S_{21}^2(\omega) = \frac{1}{H_N(\omega)} = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \cdot C_N^2(\omega)} \quad (2)$$

式中  $C_N(\omega)$  为滤波器的特征函数, 是广义切比雪夫函数或椭圆函数。

### 1.3 耦合系数矩阵<sup>[3-4]</sup>

应用上述原理可进行原型网络的综合, 形成实数网络。根据阻带衰减指标, 选择滤波器的拓扑结

构,先确定阶数和传输零点的位置和初值,再带入传输函数多项式,用软件编程,获得归一化的频响图,这是一个迭代的过程。

耦合矩阵的综合可采用达林顿法或部分分式展开法。由于达林顿法在综合低通原型的电感、电容时,计算量非常大。本文采用部分分式展开法得到耦合矩阵,此耦合矩阵是满阵,还需通过相似和旋转变换,消去矩阵中不易实现的耦合单元,最终获得要求归一化的耦合系数矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1.0352 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.91508 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.69992 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.91508 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0352 \end{bmatrix} \quad (3)$$

上述方法可获得对称、非对称及带复杂传输零点的耦合矩阵。

## 2 电参数的物理结构实现和仿真优化

技术指标要求:中心频率为14.5 GHz,损耗<1.5 dB,3 dB带宽为140 MHz,驻波<1.5,  $f_0$ ±500 MHz处带外抑制度>40 dB。

对Ku波段的滤波器通常采用BJ140波导结构实现,对在6 GHz以下的滤波器采用同轴或梳状结构较合适。除损耗外,主要是基于加工精度方面的考虑。但采用梳状结构获得尺寸较小。因此,我们确立了梳状结构的设计方案。

采用电磁场数值计算方法或电磁软件对各种耦合结构进行仿真分析,获得耦合矩阵中各元素相对应的结构参数,完成滤波器的设计。

### 2.1 单谐振腔仿真

尽管梳状线带通滤波器是一种能得到较宽阻带的带通结构,但若应用在频率很高的Ku波段时,由于其同轴线特性,如果腔体尺寸选取不当,高次模将影响高端阻带。谐振腔结构尺寸参数选择原则为

(1) TEM单模传输的工作条件为:

$$\lambda > \pi(D + d)/2 \quad (4)$$

式中  $D$  和  $d$  分别表示同轴腔外导体直径和内导体直径。波长  $\lambda$  要按照所要抑制的阻带频率选取。因此设计时尽量选取小腔体,以免引起高次模使滤波器的高端阻带抬高,影响滤波器的幅频特性。

(2) 满足功率容量要求。当  $D/d=1.65$  时功率容量最大。

(3) 损耗要小。当  $D/d=3.6$  时谐振腔的无载  $Q$  值最高,损耗最小。

应用HFSS对单个谐振腔建模,模型如图1所示。

示,进行本振模分析。经优化,确定谐振杆的尺寸为  $\varnothing 3 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$ 。谐振腔尺寸为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 。单腔的无载  $Q$  值为6900。

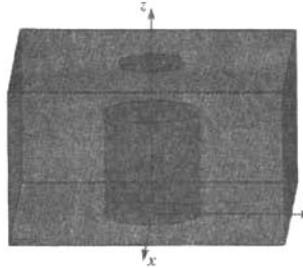


图1 单个谐振腔仿真模型

### 2.2 腔间耦合系数的仿真

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、且对源和负载具有非常小的耦合时,  $k_{ij}$  与相邻谐振腔谐振频率  $f_i, f_j$  存在下的关系为

$$k_{ij} = 2(f_i - f_j)/(f_i + f_j) \quad (5)$$

因此,对相邻谐振腔在不接源和负载的条件下进行分析,得到不同膜片宽度和耦合系数的关系。仿真模型如图2所示。

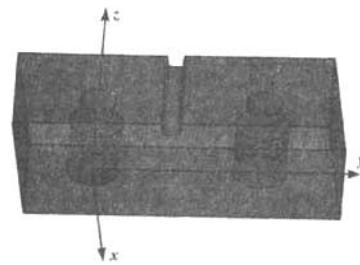


图2 腔间耦合系数仿真模型

需要注意的是谐振器间的磁耦合和混合耦合实现正耦合,电耦合实现负耦合。仿真得到的滤波器的频响如图3所示。

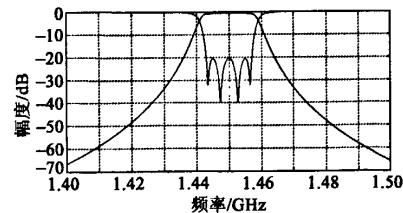
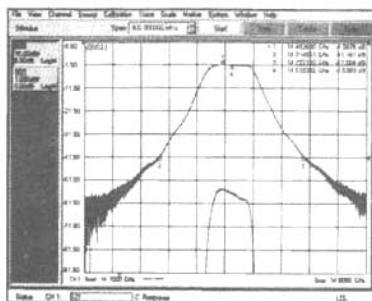


图3 滤波器频响特性仿真结果

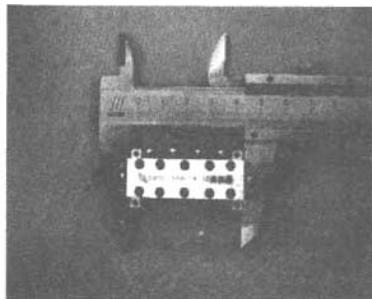
## 3 性能测试

使用计算机辅助设计软件,经过优化,最终得到的滤波器腔体尺寸为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ ,内导体中间加入1 mm宽的耦合膜片实现相邻腔体间的耦合,滤波器的内导体设计为直径相同的圆杆,输入、输出接口采用探针耦合方式。

图4为带通滤波器的幅频响应曲线和滤波器的实物照片。测试结果表明,插入损耗 $L_i < 1.4$  dB,带内波动 $< 0.5$  dB,回波损耗 $< -15$  dB,在 $f_0 \pm 500$  MHz处带外抑制度 $> 40$  dB。



(a) 测试曲线



(b) 实物图

图4 滤波器的幅频响应测试曲线和实物

(上接第129页)

法来寻优,最后采用得到的DOA恢复各个标签的信号并解码。实验表明:本法适用于标签和天线距离满足远场条件的多标签识别;使用时标签数目要小于天线阵元数;DOA的精度和分辨率都随着标签数目增加而减小;估计出的DOA只有在精度满足一定条件下,才能正确解码。因此,在满足远场条件时,标签数相比天线阵元数较小的场合,本方法能取得良好的多标签识别效果。

#### 参考文献:

- [1] HARTMANN C S, HARTMANN P, BROWN P, et al. Anti-collision methods for global SAW RFID tag systems[C]. US: IEEE, 2004: 805-808.
- [2] TORRES-ROSARIO J A. Implementation of A phased array antenna using digital beamforming[D]. Mayaguez: University of Puerto Rico, 2005.

因为滤波器设计有调谐,并且输入、输出的耦合也可调,所以若精细调试滤波器,加入调谐螺钉,还可使波动、驻波、群时延、相位等指标做到更好。仿真结果和实验结果基本一致,存在差异的主要原因是没有考虑金属导体的损耗,装配和加工误差的差异带来了带外抑制的不同。

#### 4 结束语

本文以梳状滤波器为基础,在Ku频段实现了较好的指标。它的阻带特性优于微带滤波器,而体积比波导滤波器小,结果表明,该设计方法确实有效,很好的满足了设计要求,在组件小型化要求较高的场合中,拥有相当广泛的使用空间。

#### 参考文献:

- [1] 甘本拔,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.
- [2] 柳维君.微波技术基础[M].成都:电子科技大学出版社,1989.
- [3] SMALIN Amari. Synthesis of cross-coupled resonator filters using an analytical gradient-based optimization technique[J]. IEEE Trans, MTT, 2000, 48(9): 1 559-1 563.
- [4] WALID A Atia. Synthesis of general topology multiple coupled resonator filters by optimization [J]. IEEE MTT-S Digest, 1998, 2(46): 821-824.

- [3] HARTMANN C S, BROWN P, BELLAMY J. Design of global SAW RFID tag devices[C]. Japan: Proc Second Int Symp on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Commun Syst, 2004: 15-19.
- [4] WONG K M, ZHANG Qi-tu, REILLY J P, et al. On information theoretic criteria for determining the number of signals in high resolution array processing[J]. IEEE Trans Acoust Speech Signal Process, 1990, 38(11): 1 959-1 971.
- [5] VIBERG M, OTTERSTEN B, KAILATH T. Detection and estimation in sensor arrays using weighted subspace fitting [J]. IEEE Trans Signal Process, 1991, 39(11): 2 436-2 449.
- [6] 王小平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [7] VAN V B D, BUCKLEY K M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering [J]. IEEE ASSP Mag, 1988, 5(2): 4-24.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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>