

文章编号:1001-893X(2012)07-1164-05

# Ka 频段薄膜滤波器设计\*

成彦

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

**摘要:**介绍了一种简单有效的 Ka 频段薄膜微带滤波器设计方法。通过选择恰当的滤波器模型,提取参数和初值,用 ADS 和 Designer 两种仿真软件结合进行设计,得到了理想的滤波器响应曲线。通过三轮滤波器投版测试得到工艺补偿准确值,用于修正仿真设计和滤波器实际曲线之间的偏差,最后达到了投片测试 results 和仿真设计基本吻合的目的。

**关键词:**毫米波前端;Ka 频段;薄膜滤波器;工艺补偿

**中图分类号:**TN85;TN713      **文献标志码:**A      doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.024

## Design of a Ka – band Thin Film Filter

CHENG Yan

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:**This paper introduces an efficient method for designing a Ka – band thin film filter. Through choosing proper filter model and extracting parameters and initial values, ADS and Designer tools are used to obtain ideal curve of the filter. The technological compensation value through three tests is used to correct the error between simulation result and actual result. Finally, the actual curve accords to simulation curve.

**Key words:**millimeter wave front – end; Ka – band; thin film filter; technological compensation

### 1 引言

毫米波具有波束窄、可用频带宽的特点,在保密、抗干扰、大容量、精确指向等方面具有显著优势。目前,毫米波已广泛应用于雷达、制导、通信、遥感、频谱学及生物效应等领域<sup>[1]</sup>。

系统通常对毫米波前端的体积重量有较高的要求。滤波器是收发前端的关键部件,承担着滤除各种谐波、镜频等的作用,其性能的优劣对前端影响很大。波导膜片滤波器具有带内插损小、带外抑制度高、矩形系数好等优点,缺点是体积大,不能集成到电路中。

笔者曾经研制过采用 duroid5880 软基片制作的微带滤波器,用于替代波导滤波器,由于 Ka 频段微带滤波器尺寸小,加工精度要求高,软基片加工工艺

和线条精度很难满足要求,因此滤波器实测曲线很难达到仿真设计值,通带插损、带内平坦度和带外抑制等均不能满足系统要求。由于加工精度低,也导致了各批次版图不一致,生产性差。

为了解决加工精度问题,改用具有更高精度的薄膜工艺来研制微带滤波器,本文研究了一种适合薄膜工艺的滤波器设计方法,通过三轮投版测试对仿真设计进行补偿修正,最后达到了实测 results 和仿真设计曲线基本吻合的目的,验证了该滤波器设计方法行之有效。

### 2 Ka 频段薄膜滤波器设计

Ka 频段滤波器主要考虑其准确的频率定位、低插损和高平坦度、良好的阻带抑制特性,采用平行耦合式结构,基材为陶瓷基片(厚度 0.254 mm,介电常

\* 收稿日期:2011-01-20;修回日期:2012-05-23

数 9.9), 滤波器尺寸统一为  $8\text{ mm} \times 2.8\text{ mm}$ , 屏蔽腔高度设为  $2\text{ mm}$ , 采用薄膜电路工艺制作。该工艺是通过各种淀积方法如蒸发、溅射、电镀、物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)等涂覆到合适的基板上形成薄膜, 厚度在几埃范围内。再采用光刻胶光刻工艺和干法蚀刻, 可达到百分之几微米量级的精度<sup>[2-3]</sup>。

下面以一个中心频率  $34.2\text{ GHz}$ 、带宽  $500\text{ MHz}$ 、带外  $800\text{ MHz}$  抑制  $40\text{ dB}$  的三级薄膜滤波器的设计流程为例, 对该设计方法进行详细讲解。

2.1 建模提取参数与初值计算

滤波器采用平行耦合式结构, 图 1 为滤波器版图。

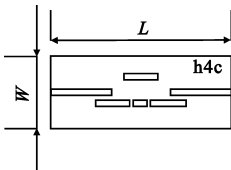


图 1 滤波器版图  
Fig. 1 Figure of the filter

首先, 参数化耦合缝宽、缝长等决定滤波器特性的关键尺寸。由于滤波器的对称性, 参数化时可以缩减一半。图 2 是滤波器参数示意图, 表 1 是滤波器各个参数的说明。

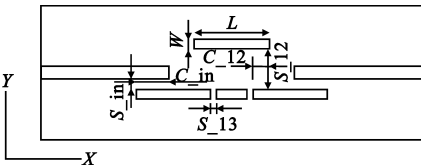


图 2 滤波器参数化示意图  
Fig. 2 Parameter of the filter

| 表 1 参数说明表<br>Table 1 Parameter list |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| 参数                                  | 说明              |
| $w_{in}$                            | 输入输出微带线宽        |
| $l_{in}$                            | 输入输出微带线长        |
| $w$                                 | 谐振枝节线宽          |
| $l$                                 | 谐振枝节线长          |
| $s_{in}$                            | 输入输出耦合缝宽        |
| $c_{in}$                            | 输入输出耦合缝长        |
| $s_{12}$                            | 1, 2 级谐振枝节间耦合缝宽 |
| $c_{12}$                            | 1, 2 级谐振枝节间耦合缝长 |
| $s_{13}$                            | 1, 3 级谐振枝节间耦合缝宽 |
| $dx$                                | 投版时 X 方向缝宽的补偿量  |
| $dy$                                | 投版时 Y 方向缝宽的补偿量  |

参数设置完成后需要计算各参数的初始值, 采用 ADS 软件进行仿真计算。图 3 是 ADS 中滤波器的仿真模型。参数化后, 设定优化目标, 利用 ADS 求得滤波器的初始值, 图 4 为滤波器初始结果。

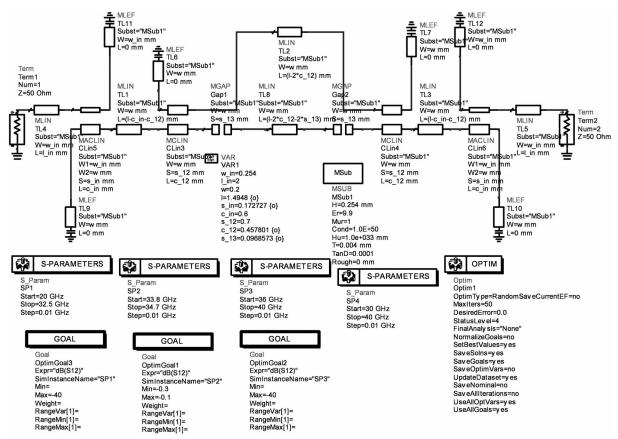


图 3 滤波器 ADS 仿真模型  
Fig. 3 Simulation model of the filter in ADS

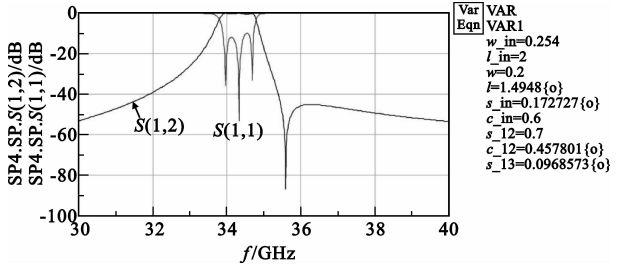


图 4 初始曲线和初始值  
Fig. 4 Initial curve and initial value

2.2 精确设计

精确设计主要针对中心频率、带宽、带内平坦度、带外抑制、衰减极点等滤波器响应特性中的关键指标。对以上指标进行精确仿真, 以确定所需滤波器的尺寸。

- (1)中心频率由微带谐振枝节决定;
- (2)带宽由滤波器级间耦合强度决定;
- (3)带内平坦度由级间耦合和输入输出耦合匹配确定;
- (4)带外抑制由滤波器级数及滤波器上腔宽度决定;
- (5)衰减极点由 1、3 级间的交叉耦合决定。

2.2.1 初值计算

精确设计采用 Ansoft Designer 场仿真软件, 图 5 为薄膜滤波器的 Designer 仿真模型。在 ADS 中提取初值后, 代入图 5 所示模型进行仿真, 得到如图 6 所示的初始结果。

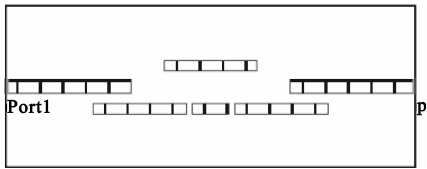


图 5 滤波器仿真模型  
Fig.5 Simulation model of the filter in Designer

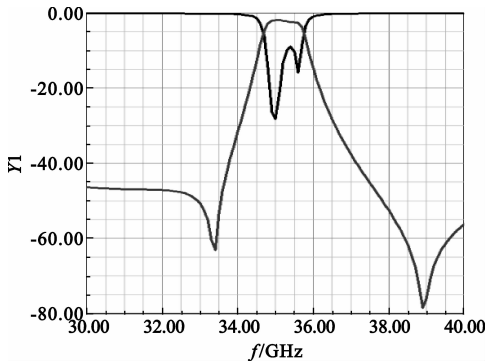


图 6 滤波器初始仿真结果  
Fig.6 Initial curve of the filter

2.2.2 调整中心频率

从图 6 可看出,滤波器中心频率上偏,需要往低调整。增大微带谐振枝节长度“*l*”的值,使其仿真结果如图 7 所示。在中心频率 35 GHz 左右,“*l*”每调节 0.01 mm,频率改变 200 MHz;中心频率随着“*l*”的增大往低偏;反之,往高偏。

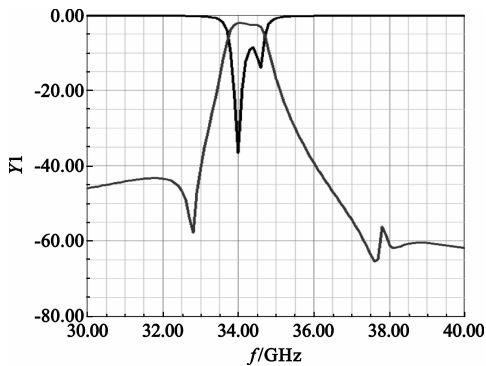


图 7 调整中心频率后曲线  
Fig.7 Curve of the filter after frequency regulation

2.2.3 调整带宽和衰减极点

需要增加带宽时,通过减小 *s*<sub>12</sub> 或增大 *c*<sub>12</sub> 值来调节。减小 *s*<sub>12</sub> 和增大 *c*<sub>12</sub>,则耦合强度增强,滤波器带宽变宽;反之,带宽变窄。

耦合系数理论值:  $k_0 = 0.67 \times (\Delta f / f_0)$ , 其中  $\Delta f$

为带宽,  $f_0$  为中心频率<sup>[4]</sup>。

微带缝隙耦合系数曲线见图 8。图中  $k_0$  为耦合系数, *s* 为耦合逢宽, *c* 为耦合缝长。

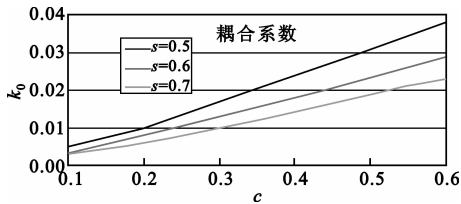


图 8 耦合系数随尺寸变化曲线  
Fig.8  $k_0$  vs. *c*

由图 7 可看出,衰减极点不对称,通过增强交叉耦合(减小 *s*<sub>13</sub>),最后得到图 9 所示结果。

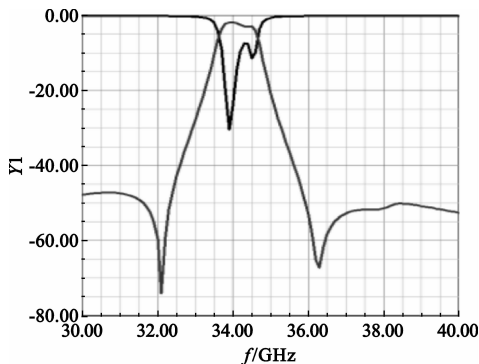


图 9 调整交叉耦合后曲线  
Fig.9 Curve after cross coupling quotiety regulation

2.2.4 带内平坦度调整

图 9 所示曲线通带中间有一个凹点,是由于输入输出欠耦合引起,需要增强输入输出耦合,通过减小 *s*<sub>in</sub> 值(或增大 *c*<sub>in</sub> 值)进行调解。反之,要减弱输入输出耦合,需要增大 *s*<sub>in</sub>(或减小 *c*<sub>in</sub>)。调整后结果如图 10 所示。

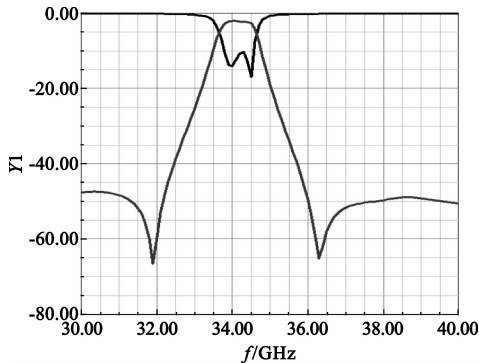


图 10 调整输入输出耦合强度后曲线  
Fig.10 Curve after input and output coupling intensity regulation

3 投片测试和工艺补偿

模型和仿真工具只能近似拟合滤波器实际特性,加工环节也会引入误差导致实物尺寸和设计值有一定偏差。因此,要达到实测响应曲线和设计值基本吻合的目的,需要通过几次投版测试结果来修正和补偿仿真和工艺等环节引入的误差。滤波器参数中针对工艺补偿的有  $dx$ 、 $dy$  两项,分别用来补偿  $X$ 、 $Y$  方向上的耦合缝宽。通过多次投版测试最终能得到  $dx$ 、 $dy$  的准确值。

图 11 是投片测试补偿工艺的流程圖。先设定滤波器各项指标,再确定滤波器拓扑和参数,借助工具软件得到滤波器仿真曲线和尺寸。投版加工滤波器实物。用矢网测试滤波器曲线并提取  $S$  参数,导入 Designer 软件和仿真曲线进行比对,曲线不吻合则通过调整滤波器补偿参数值进行预补偿,然后再次投片验证补偿效果。通过 3 轮投版,最后得到了工艺补偿的准确值,达到了实测曲线和仿真曲线基本吻合的效果。

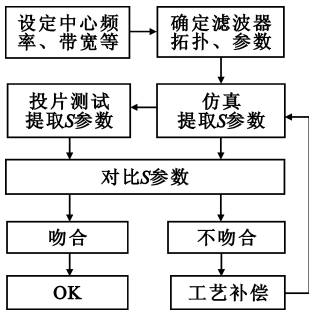


图 11 工艺补偿流程  
Fig. 11 Flow of technological compensation

工艺补偿主要是针对仿真软件与实际工艺差别,对电路所作的参数补偿,以求实测结果与设计值能够最接近。为了确定 Ka 频段各常用工作频率滤波器  $dx$  和  $dy$  的准确值,设计了中心频率分别为 26 GHz、30 GHz、35 GHz、38 GHz 的滤波器,带宽考虑 500 MHz、1 GHz 两种。8 种规格的滤波器投片后用矢网进行测试。滤波器测试台见图 12。测试时需要扣除测试台自身损耗。

以中心频率 35 GHz、带宽 1 GHz 的滤波器为例对三轮投片及修正情况进行说明。第一轮测试结果见图 13,中心频率比仿真偏低 200 MHz,带宽比仿真值宽 200 MHz。

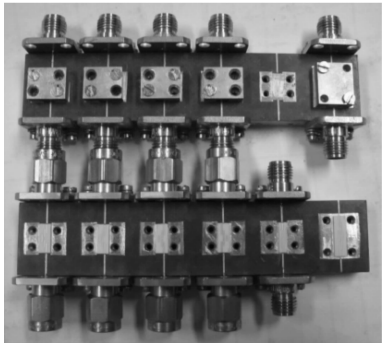


图 12 测试台实物图  
Fig. 12 Structure of the test platform

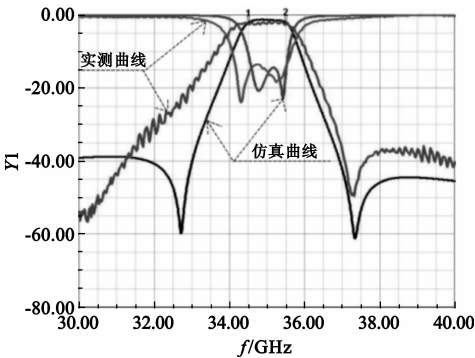


图 13 第一轮仿真、实测对比曲线  
Fig. 13 Simulated and measured curves in the first test

经过全面的数据分析后,对主要参数重新设置,并进行了修正仿真。第二轮投片测试结果如图 14 所示,中心频率比仿真偏高 200 MHz,波形与仿真基本吻合。

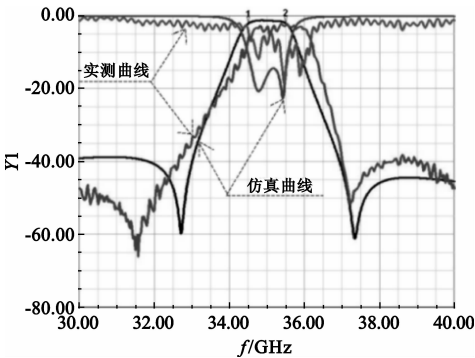


图 14 第二轮仿真、实测对比曲线  
Fig. 14 Simulated and measured curves in the second test

经数据分析发现是与频率相关的参数修正过头,对参数重新进行调整,并作了修正仿真。第三轮测试结果如图 15 所示,测试结果跟仿真曲线基本吻合。由于矢网数据导出端口损坏,未能导出实测  $S$  参数和仿真曲线进行对比,只能用实拍曲线代替。

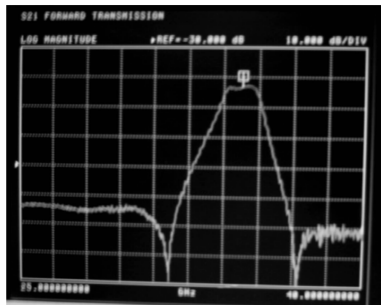
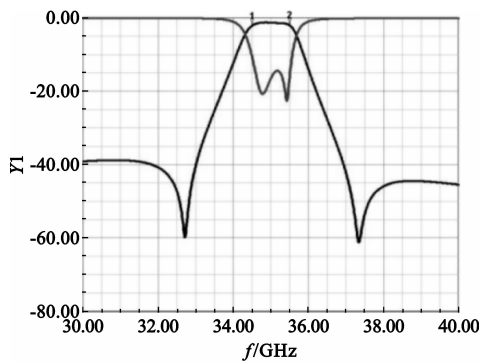


图 15 第三轮仿真、实测对比曲线

Fig.15 Simulated and measured curves in the third test

## 4 结 论

薄膜滤波器具有尺寸小、性能优良、生产一致性好、可集成到电路内等优点。本文介绍的薄膜滤波器设计方法具有快速、精确的特点。依据工艺补偿准确值,借助补偿手段,得到的滤波器实际响应曲线和仿真值基本吻合,设计一次成功率高。通过调整参数,可实现 Ka 频段滤波器系列化设计。在 Ka 频段可达到带内插损小于 2 dB,带外抑制大于 40 dB 的性能。带外抑制要求更高时,可参照此方法进行 4 级或 5 级滤波器设计,级数增加时,带内插损会相应增大。

目前,Ka 频段薄膜滤波器已经完全替代了波导滤波器应用到毫米波前端中,大大提高了前端性能。K 频段、U 频段甚至更高频段的薄膜滤波器设计也可借鉴此方法。

## 参考文献:

- [1] 甘体国.毫米波工程[M].成都:电子科技大学出版社,2006.  
GAN Ti - guo. Millimeter wave engineering [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 甘体国.毫米波组件设计手册[M].成都:中国电子科技集团公司第十研究所,2009.  
GAN Ti - guo. Millimeter wave module design handbook[M]. Chengdu: The 10th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 2009. (in Chinese)
- [3] Ng C Y, Chongcheawchamnan M, Aftanasar M S, et al. Characterisation of TFMS lines fabricated using photoimageable thick - film technology [J]. IEE Proceedings of Microwave, Antennas and Propagation, 2003, 150(3): 281 - 283.
- [4] 李倩,杨志,胡小东. MEMS 毫米波滤波器的设计与制作[J].微纳电子技术,2010,47(3): 50 - 53, 58.  
LI Qian, YANG Zhi, HU Xiao - dong. Design and Fabrication of MEMS Millimeter - Wave Filters [J]. Micronanoelectronic Technology, 2010, 47(3): 50 - 53, 58. (in Chinese)

## 作者简介:

成彦(1976—),女,重庆忠县人,2000 年于电子科技大学获学士学位,现为工程师,主要从事毫米波组件的开发研究工作。

CHENG Yan was born in Zhongxian, Chongqing, in 1976. She received the B.S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000. She is now an engineer. Her research concerns R&D of millimeter wave module.

Email: free\_bird3@163.com