

高镜像抑制带通滤波器的优化设计

刘 芬,郑宏兴,高凤友

(天津工程师范学院天线与微波技术研究所,天津 300222)

摘要:研究卫星天线射频信号优化问题,因镜频干扰在变频接收系统中影响很大,通常采用高品质的镜像抑制带通滤波器来处理高频信号。为了提高带通滤波器的镜像信号抑制能力和减小噪声系数,进一步减小多种干扰,提出微带带通滤波器设计方法和ADS软件优化设计高镜像抑制方法。方法通过对传输零点的准确定位,可实现选择性地抑制镜像信号。理论分析和仿真结果表明,所设计的带通滤波器性能和理论值一致,具有高镜像抑制能力、噪声系数低,同时还可以满足带内插损和带外抑制的设计要求,对工程应用有一定的指导意义。

关键词:带通滤波器;镜像抑制;传输零点

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**B

Optimal Designing of High Image - reject Microwave Bandpass Filter

LIU Fen, ZHENG Hong - xing, GAO Feng - you

(Institute of Antenna and Microwave Techniques, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, 300222)

ABSTRACT: The disturbance of image frequency sways badly in the frequency conversion system. Usually, the radio frequency image - reject filter with high quality is chosen to process the high - frequency signal. To overcome the shortcomings of existing microwave bandpass filter with low image rejection and noise factor, a new method using the software ADS is presented in this paper. Based on the accurate positioning of transmission zero, undesired image signal and noise factor are imitated over -45 dB and under 2 dB respectively. And a miniaturized microwave bandpass filter which has the least devices is designed by the new method. The simulation results show that the high image - reject bandpass filter is in accordance with the theoretic analysis, and the provided design method is very simple, convenient and suitable for the engineering design.

KEYWORDS: Bandpass filter; Image - reject; Transmission zero

1 引言

具有高抑制能力的滤波器在许多射频/微波系统中是非常重要的模块组件,这些系统需要对无用的镜像信号进行抑制。

采用交叉耦合结构^[1]来制作高抑制滤波器,能够在不相邻谐振器之间的交叉耦合产生改善幅度衰减的传输零点。但是,采用这种方法来设计平面滤波器将需要至少四个谐振器^[2],才能达到良好的衰减特性,且由于有多个谐振器进而产生了高的插损。通过设计传统带通滤波器来实现高镜像抑制和低插损是可能的,例如交指型^{[3][4]}、发夹型^{[5][6]}、终端耦合^[7]以及空腔配置^[8]等。其中,空腔滤波器提供了高抑制,但往往很笨重,难以与微波集成电路进行集成。终端耦

合和发夹型滤波器微波频段最为常用,但这些类型带通滤波器表现出不良的二次谐波信号成分,而且由于需要很多的谐振器使得尺寸很大。例如文献[9]中提出的新型发夹型带通滤波器为获得带外30dB的抑制能力阶数在五阶以上。

本文给出的微带带通滤波器设计方法是通过传输零点^[10]的灵活控制,从而获得理想的镜像抑制和二次谐波抑制能力,同时采用最少的谐振器利用其紧凑结构实现小型化。在本文的最后对提出的结构给出了设计实例,并利用微波ADS软件对其进行了仿真、优化,证实了设计方法的正确性。

2 滤波器设计中的镜像抑制问题

卫星信号经天线进入接收机,经过前置放大后送入射频滤波器。设计的射频滤波器要能滤除带外干扰和杂散信号,对信号进行预选,减少由于混频器的非线性引入的各种干扰。

外差式接收机^[11]的最大缺点是组合干扰频率点多。这是因为变频器往往不是一个理想乘法器,而是一个能完成相乘功能的非线性器件,它将进入的有用信号(频率为 f_{RF})和本振信号(频率为 f_{LO}),以及混入的干扰信号通过变频器非线性特征中的某一高次方项组合产生组合频率,若它们落在中频频带内,就会形成对有用信号的干扰。这些组合频率引起的干扰称为寄生通道干扰。

在寄生通道干扰中,一种称为镜像干扰的现象最为严重。镜像频率(f_{IM})信号是相对于有用信号而言位于本振信号的另一侧,且与本振频率之差也为中频 f_{IF} 的信号,即:

$$f_{IM} = f_{RF} - 2f_{IF} \quad (1)$$

如果镜像频率信号没有被变频器前面的电路滤除而进入了变频器,即使变频器是一个理想的乘法器,镜频信号与本振信号混频后得到的也是中频信号,因此中频滤波器无法将其滤除。

要消除镜像频率干扰,不让它进入混频级,就要靠前面的射频滤波器来滤除镜像频率信号。此时的射频滤波器要设计为带通滤波器,带通滤波器能否有效滤除镜频干扰信号,关键看滤波器的品质因数。为了有效消除镜像频率干扰,一般要求镜像抑制滤波器的抑制度不小于40dB。

3 高镜像抑制带通滤波器的设计原理

这里采用两个面对面的发夹型谐振器来实现高镜像抑制带通滤波器,其结构如图1(a)所示。每个发夹型谐振器是半波长耦合微带谐振器的一种变形,是将半波长耦合谐振器折合成“U”字型构成的。谐振器之间的间隙可等效为间隙电容,这样就相当于两条微带线通过一个串联电容 C_{12} 而互相耦合起来,同时在两条微带线的截断端与底衬之间也存在一等效电容 C_1 ,因此,可以将微带线的间隙等效为 π 型电路,如图1(b)所示。图中 $B_0 = \omega_0 C_{12}$, $B_a = \omega_0 C_1$ 。

根据微带电路理论,图1(b)的等效电路参数 B_a 和 B_0 与 J/Y_0 的关系为:

$$J/Y_0 = |tg[(\phi/2) + tg^{-1}(B_a/Y_0)]| \quad (2)$$

式中,

$$\phi = -tg^{-1}[(2B_0/Y_0) + (B_a/Y_0)] - tg^{-1}[(B_a/Y_0)] \quad (3)$$

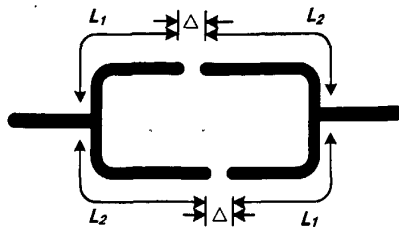
ϕ 为负的电长度。由式(2)可知,在间隙等效电路两端加一负电长度后等效为一个电纳为 J/Y_0 的电纳倒置转换器。但是,该电路在实际使用中必须用在其相邻电路具有相同导纳的传输线中,使其负值电长度加在相邻的传输线上,从而抵消了负的电长度。根据滤波器理论,可得到以下公式:

$$J_{01}/Y_0 = \sqrt{\pi W/(2g_0g_1\omega'_1)} \quad (4)$$

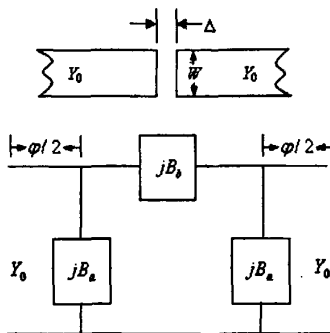
$$\frac{J_{j,j+1}}{Y_0} \bigg|_{j=1-n-1} = \frac{\pi W}{2\omega'_1 \sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (5)$$

$$J_{n,n+1}/Y_0 = \sqrt{\pi W/2g_n g_{n+1}\omega'_1} \quad (6)$$

式中 g_j 是低通原型滤波器的元件值, n 为滤波器的阶数, ω'_1 是其归一边带频率; W 是带通滤波器的相对带宽。



(a)结构示意图



(b)等效电路

图1 高镜像抑制带通滤波器

对于小电容间隙耦合传输线滤波器,可近似令 $B_a = 0$,即 $C_1 = 0$,这时可得下列关系式:

$$B_{j,j+1}/Y_0 = \frac{J_{j,j+1}/Y_0}{1 - (J_{j,j+1}/Y_0)^2} \quad (7)$$

$$C_{j,j+1} = B_{j,j+1}/\omega_0 \quad (8)$$

$C_{j,j+1}$ 是微带间隙的耦合电容。图1(b)等效电路两边的负电长度 $\phi/2$ 应合并到半波长谐振器的电长度上,使得半波长谐振器的实际电长度为 π 减去两个相邻导纳倒置转换器的负电长度 $\phi/2$,即:

$$\theta_j = \pi - [tg^{-1}(2B_{j-1,j}/Y_0) + tg^{-1}(2B_{j,j+1}/Y_0)]/2 \quad (9)$$

半波长谐振器的实际长度 l_j 可通过下式得到:

$$l_j = \lambda \theta_j / (2\pi \sqrt{\epsilon_r}) \quad (10)$$

其中 ϵ_r 为有效介电常数。结合具体电路参数,比如微带电路的相对介电常数,厚度等,通过计算机优化设计可得到间隙间隔宽度 Δ 。

4 设计过程和仿真结果分析

采用ADS软件对滤波器进行设计的过程如图2所示。

4.1 关键参数计算

设计一个通带为4.52GHz到4.65GHz的带通滤波器,所用印制板的介电常数为10.2,板材厚度为0.65mm,铜箔厚度为0.035mm。选用通带波纹为0.1的Chebyshev低通原型滤波器。通过(7)-(10)式可求得发夹谐振器的臂长为12.5mm,且 $L_1 = 6.7$ mm, $L_2 = 5.8$ mm。由抽头所在位置 L_1 、 L_2 可确定引入传输零点所在的频率。即:

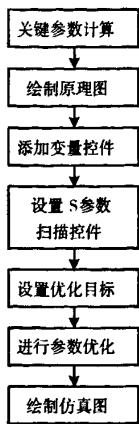


图2 ADS 软件设计滤波器的过程

$$f_1 = c / (4L_1 \sqrt{\epsilon_r}) = 4.3\text{GHz}$$

$$f_2 = c / (4L_2 \sqrt{\epsilon_r}) = 4.92\text{GHz}$$

4.2 优化目标的设置

电路原理图和设置的优化目标如图3所示。其中共设置了四个优化目标,前三个的优化参数都是 S_{21} ,用来设定滤波器通带和阻带的频率范围和衰减情况(这里要求通带衰减小于2dB,阻带衰减大于40dB),最后一个优化参数是 S_{11} ,用来设定通带内的反射系数(这里要求小于-20dB)。

GOAL	GOAL	GOAL	GOAL
Goal OptimizeGoal1 Expr="dB(S(2,1))" SimulateGoalName="SP1" Min=-2 Max=40 Weight=100 RangeMin[1]="4.52 GHz" RangeMax[1]="4.92 GHz"	Goal OptimizeGoal2 Expr="dB(S(2,1))" SimulateGoalName="SP1" Min=-2 Max=40 Weight=100 RangeMin[1]="4.52 GHz" RangeMax[1]="4.92 GHz"	Goal OptimizeGoal3 Expr="dB(S(2,1))" SimulateGoalName="SP1" Min=-2 Max=40 Weight=100 RangeMin[1]="4.52 GHz" RangeMax[1]="4.92 GHz"	Goal OptimizeGoal4 Expr="dB(S(1,1))" SimulateGoalName="SP1" Min=-2 Max=40 Weight=100 RangeMin[1]="4.52 GHz" RangeMax[1]="4.92 GHz"

图3 设置优化目标

4.3 仿真结果及分析

图4仿真结果表明,在4.3GHz和4.92GHz间所要求频率上有超过-40dB的优良带外抑制,并且在较低频率上有优于-30dB的抑制。滤波器的回波损耗优于-20dB,且具有低于-20dB的二次谐波。

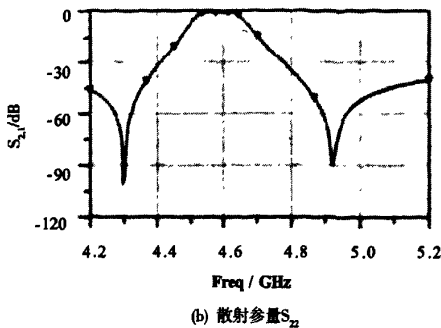
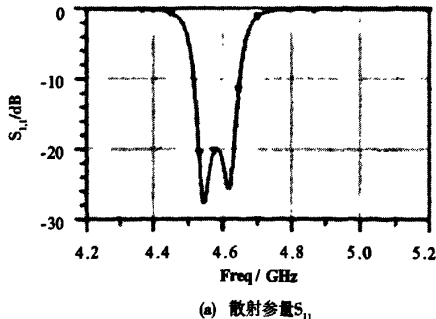


图4 仿真结果

由图4可知,改变抽头位置可改变传输零点的位置,进而影响滤波器的选择性,但这可能导致过耦合。除了由抽头位置造成的耦合效应外,耦合间隙 Δ 也影响了两个谐振器之间的耦合,如图5所示。

(下转第91页)

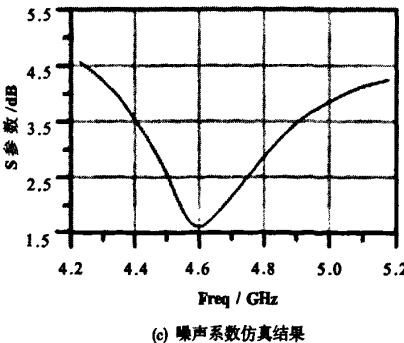
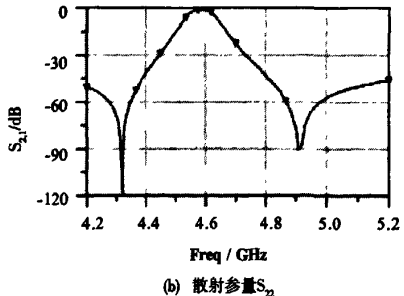
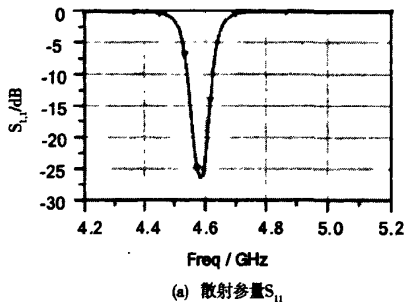


图5 增大耦合间隙后的仿真结果

不大;

3) 氧化剂喷注速度对侧壁面温度影响很大, 提高喷注速度会显著降低壁温;

4) 在保持室压和喷注速度不变的前提下, 增加燃烧室的长度会增加热辐射, 使壁温呈线性升高。

本文的计算结果与文献的实验结论一致, 具有较高的可信度。该模型可作为涡流燃烧发动机的设计工具, 对进一步的实验研究有指导意义。

参考文献:

- [1] Martin J Chiavertini, Matthew J Malecki, J Arthur Sauer. Vortex combustion chamber development for future liquid rocket engine [R]. AIAA-2002-4149, 2002.
- [2] J Arthur Sauer, William H Knuth, Matthew J Malecki. Development of a LOX/RP-1 vortex combustion cold-wall thrust chamber assembly [R]. AIAA-2002-4144, 2002.

(上接第 73 页)

从图 5 可以看到: 耦合间隙的增加导致了更好的品质因数 Q ; 在中心频率 4.59GHz 处, 端口反射系数 S_{11} 保持在 -25dB 以下, 滤波器对信号的损耗 S_{21} 在 -2dB 以内, 噪声系数为 1.621dB; 在镜像频率点处 S_{21} 小于 -45dB。此结果优于图 4, 可有效抑制镜像频率干扰, 能达到设计要求。但为避免过耦合条件, 应慎重选择抽头位置和间隙大小。一旦确定了抽头位置, 对所要求的滤波器响应, 耦合间隙应进行优化选择。

5 结束语

本文给出了高镜像抑制带通滤波器的原理和整个设计过程。可以看出, 所设计的滤波器通过控制传输零点实现了较高的镜像抑制且没有不良耦合, 适用于乘法器或其他要求对镜像信号抑制的器件中。该设计方法还提供了用于放大器和频率源的优良二次谐波抑制。在设计过程中, 以小电容间隙耦合间隔作为优化目标参数来寻求最优解, 从而在保证设计精度的同时提高了设计效率。

参考文献:

- [1] Hong Jiasheng, M J Lancaster. Couplings of microstrip square openloop resonators for cross-coupled planar microwave filters [J]. IEEE MTT, 1996, 44(12): 2099-2108.
- [2] 赵亮, 李平解, 崔志富. 一种带有新型寄生通带抑制结构交叉耦合滤波器设计 [J]. 军事通信技术, 2007, 28(4): 84-86.
- [3] 牟亚妮, 马哲旺. 一种新型交指-发夹型多层带状线带通滤波器 [J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2238-2241.

- [3] Martin J Chiavertini, Matthew J Malecki, J Arthur Sauer. Vortex thrust chamber testing and analysis for O₂-H₂ propulsion applications [R]. AIAA-2003-4473, 2003.
- [4] Martin J Chiavertini, J Arthur Sauer, Scott M Munson. Laboratory characterization of vortex-cooled thrust chambers for methane/O₂ and H₂/O₂ [R]. AIAA-2005-4131, 2005.
- [5] 孙得川. 火箭发动机性能化学平衡/化学动力学分析 [R]. 博士后工作报告, 2002-12.

[作者简介]



孙得川 (1973-), 男 (汉族), 河北容城人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为航天推进系统, 复杂流场数值模拟。

白荣博 (1982-), 男 (回族), 河南新乡人, 硕士研究生, 主要研究领域为流动数值模拟。

刘 上 (1984-), 男 (汉族), 湖北武穴人, 博士研究生, 主要研究领域为液体火箭发动机。

- [4] 王义, 楚光辉. 一种微带交指型滤波器的改良型设计 [J]. 电磁场与微波, 2007, 37(12): 34-36.
- [5] 邓哲, 等. 微带发夹型谐振器滤波器的实验研究 [J]. 微波学报, 2005, 21(4): 122-126.
- [6] 高媛, 邓中亮. 微带发夹型带通滤波器设计 [J]. 电磁场与微波, 2008, 38(4): 40-42.
- [7] J S Hong, M J Lancaster. Microstrip Filter for RF/Microwave Applications [M]. New York: Wiley, 2001.
- [8] 邓贤进, 李家胤, 张健. 微波腔体滤波器的快速设计及仿真 [J]. 微波学报, 2006, 22(4): 53-56.
- [9] 陈世勇, 曹海林, 杨士中. 一种新型微带 Hairpin 带通滤波器的设计 [J]. 微波学报, 2006, 22(5): 57-60.
- [10] 程兴, 苏涛, 梁昌洪. 交叉耦合滤波器设计与传输零点的独立性分析 [J]. 微波学报, 2006, 22(1): 34-38.
- [11] 李进杰, 张永顺. 采用 Simulink 实现超外差接收系统的动态仿真 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(12): 35-37.

[作者简介]



刘 芬 (1979-), 女 (汉族), 河北省石家庄市人, 讲师, 主要研究领域为数字信号处理和微波电路。

郑宏兴 (1962-), 男 (汉族), 宁夏银川市人, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为无线通信和应用电磁学。

高凤友 (1962-), 男 (汉族), 黑龙江省佳木斯市人, 高级实验师, 主要研究领域为无线电电子与通讯、电子产品可靠性设计。

微波滤波器设计培训——视频课程

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, 致力和专注于微波、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/>