

# 具有高带外抑制特性的滤波器天线集成设计\*

马 犇 吴为军 陈 亮 肖 龙

(中国舰船研究设计中心 电磁兼容实验室,武汉 430064)

**摘要:** 利用滤波器综合设计方法设计了一款新型的具有高带外抑制性的微带滤波器天线。滤波器天线由五个开口谐振环、平行耦合线和倒 L 天线组成。设计思路是使用倒 L 天线代替滤波器的最后一个谐振器,然后利用平行耦合线等效为导纳变换器将谐振器与天线进行耦合,从而设计出既有滤波性能又有辐射性能的滤波器天线。滤波器天线采用交叉耦合结构,在带外有两个传输零点,大大提高了滤波器天线的带外抑制能力。滤波器天线经过仿真和测试,结果显示其反射系数  $S_{11} < -10$  dB 的相对带宽为 8% (2.37 ~ 2.57 GHz),带内增益约 1.6 dBi,传输零点在带外 50 MHz 处,增益下降到 -25 dBi,带外整体下降到 -20 dBi 以下,带外抑制特性显著。

**关键词:** 滤波器天线,交叉耦合滤波器,传输零点,滤波器综合设计方法

## Integrated Design of Filter-Antenna with High Stop-Band Suppression

MA Ben, WU Wei-jun, CHEN Liang, XIAO Long

(Science and Technology on Electromagnetic Compatibility Laboratory, China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** In this paper, co-design approach is used to design a new micro-strip filter-antenna with high stop-band rejection. This filter-antenna consists of five open-loop resonators, parallel coupled line and invert L-shaped antenna. The design method is in the following: replace the last resonator of filter by antenna on account of its resonance characteristic, connect antenna with filter resonator by parallel coupled line which can be equivalent to admittance inverter. In this way the filter-antenna with filtering and radiation characteristic is obtained. Filter-antenna adopts cross-coupled structure with two transmission zeros outside the band. It greatly improves the performance of stop-band rejection. After simulating and testing, the result shows that filter-antenna has about 8% (2.37 ~ 2.57 GHz) fractional bandwidth in condition that  $S_{11} < -10$  dB, and the gain in band is about 1.6 dBi. Transmission zeros locate 50 MHz outside the band, where the gain decreases to -25 dBi. The gain drops to -20 dBi in whole stop-band. The results indicate that the designed filter-antenna has remarkable stop-band suppression characteristics.

**Key words:** filter-antenna, cross coupled filter, transmission zero, filter co-design method

## 引 言

近年来,无线通信领域发展迅猛,迫切要求通信系统向更轻、更小、性能更好的方向发展。为此,不少学者将不同的射频器件进行集成设计。滤波器和天线处在射频前端,是无线通信系统的咽喉要道,对整个系统的性能起决定性作用。传统方法将滤波器和天线直接级联,易造成阻抗失配恶化整体性能。因此,将滤波器和天线进行集成化设计就显得很有必要。

最早进行相关研究的是 Froppier<sup>[1]</sup>,他在喇叭

天线中引入多根金属柱,使天线不仅起辐射作用,还起滤波作用。Bailey<sup>[2]</sup>设计了具有 3 个谐振点的微带天线,表现出了一定的滤波特性。但这些研究没有给出通用的设计方法。随着研究的进展,研究者们开始考虑采用滤波器综合设计方法来进行滤波器天线的集成设计<sup>[3-7]</sup>。Chuang 等人在文献[3]中设计了一款三阶平行耦合微带滤波器天线,用倒 L 型天线代替平行耦合滤波器的最后一个谐振器,设计的滤波器天线与原型滤波器有相似的滤波特性。但是边带不够陡峭,滤波特性有待提高。吴为军在文献[4]中提出了一款三阶微带开环谐振滤波器天

\* 收稿日期:2017-09-03;修回日期:2017-12-07

线,用 $\Gamma$ 天线替换开环谐振器,用平行耦合线将天线与谐振器耦合,结构比文献[3]更加紧凑,但带外抑制性能仍有限。Yusuf在文献[5]提出了一款SIW(介质集成波导)滤波器天线,由缝隙天线代替滤波器的谐振器。设计结构紧凑,通带内滤波特性良好,但是带外滤波特性欠佳,而且SIW结构制作相对微带结构较复杂,成品与设计的误差较大,容易产生频率偏移。

本文设计了一款新型的具有高带外抑制特性的六阶微带滤波器天线。滤波器天线由五个开口谐振环、平行耦合线和倒L天线组成。倒L天线等效为RLC电路,R部分起辐射作用,LC部分起谐振作用,充当滤波器的一个谐振器。平行耦合线等效为导纳变换器,连接天线与谐振器,保证天线在起辐射作用的同时还能充当一个谐振器。滤波器天线采用交叉耦合结构,在边带引入两个传输零点。仿真和测试结果显示该滤波器天线在带外50 MHz出现传输零点,增益下降到-25 dBi,带外的增益整体下降到-20 dBi,带内增益非常平缓,最大增益差只有0.3 dBi。该结果表明该滤波器天线具有良好的边带陡峭性、高带外抑制性。与单独的倒L天线相比,又具有平稳的带内增益。与直接连接滤波器和天线的方法相比,还减小了系统的尺寸和损耗。

## 1 滤波器天线综合设计

本文采用滤波器综合设计方法进行设计,设计步骤按以下三步进行:1)设计原型滤波器;2)设计具有与原型滤波器单个谐振器相似电参数的天线;3)设计耦合结构,将天线取代滤波器的最后一个谐振器,利用耦合结构进行集成设计。

### 1.1 原型滤波器设计

在进行滤波器天线集成之前,设计了一款微带六阶交叉耦合滤波器,如图1(a)所示。传统的滤波器是相邻的谐振器相互耦合,传输零点在无限远处。交叉耦合滤波器让非相邻谐振器之间相互耦合,产生多条电磁信号路径,通过调整谐振器的间距可以让两条不同路径的电磁信号相互抵消,得到有限频带内的传输零点<sup>[8]</sup>。如图1(b)所示,信号进入输入端口,分两路123456和1256到达输出端口,两路信号相互抵消,产生传输零点。这样增加了边带的陡峭性,提高了滤波器的选择性。本文的原型滤波器中心频率为2.45 GHz,相对带宽为8%,波纹系数为0.1 dB,介质板的介电常数为 $\epsilon_r = 2.65$ ,厚度 $h = 0.6$  mm。通过式(1)~(4)可以求得滤波器的耦合

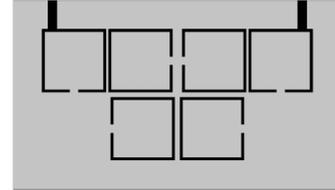
系数和外部品质因数。

$$Q_{ei} = Q_{eo} = C_1 / FBW \quad (1)$$

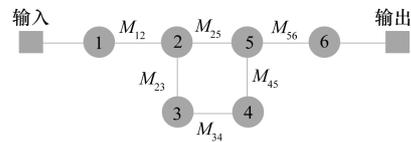
$$M_{n,n+1} = M_{N-n,N-n+1} = FBW / \sqrt{C_{n,n+1}}, 1 \leq n \leq m-1 \quad (2)$$

$$M_{m,m+1} = FBW \cdot J_m / C_m \quad (3)$$

$$M_{m-1,m+2} = FBW \cdot J_{m-1} / C_{m-1} \quad (4)$$



(a) 滤波器实际结构



(b) 滤波器拓扑结构

图1 滤波器实际结构和拓扑结构

式(1)~(4)中, $Q_{ei}$ 和 $Q_{eo}$ 分别为输入端和输出端的外部品质因数, $M_{m,m+1}$ 为第 $m$ 个和第 $m+1$ 个谐振器之间的耦合系数, $FBW$ 为滤波器相对带宽, $m = N/2$ , $N$ 为滤波器的阶数。低通原型滤波器值为 $C_1 = 1.008$ , $C_2 = 1.434$ , $C_3 = 2.037$ , $J_2 = -0.189$ , $J_3 = 1.400$ 。进而可求得外部品质因数 $Q_{ei} = Q_{eo} = 12.67$ ,耦合系数 $M_{1,2} = M_{5,6} = 0.067$ , $M_{2,3} = M_{4,5} = 0.047$ , $M_{3,4} = 0.055$ , $M_{2,5} = -0.011$ 。

谐振器的外部品质因数 $Q_e$ 主要由抽头的馈电位置 $d$ 决定,可以对单个谐振器进行单端口仿真,利用式(5)计算求得。

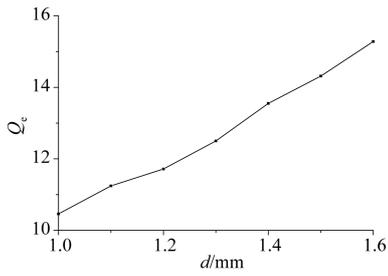
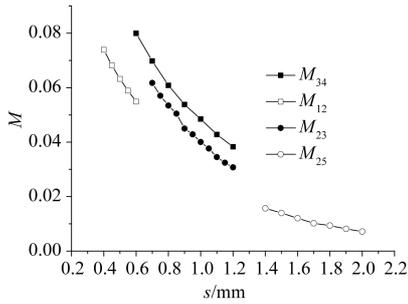
$$Q_e = \frac{f_0}{\Delta f_{\pm 90^\circ}} \quad (5)$$

式(5)中 $f_0$ 表示谐振器的谐振频率, $\Delta f_{\pm 90^\circ}$ 表示比谐振频率 $f_0$ 相位高 $90^\circ$ 与低 $90^\circ$ 所对应频率的差值。图2是谐振器外部品质因数 $Q_e$ 与抽头位置 $d$ 的关系图。 $Q_e$ 随着 $d$ 的变大而变大。在 $d = 1.1$  mm的时候对应的 $Q_e = 12.67$ 。

谐振器的耦合强度是由谐振器的间距决定的,可对谐振器进行本征模求解,得到一对谐振频率 $f_1$ 和 $f_2$ ,利用式(6)可以计算出耦合系数。

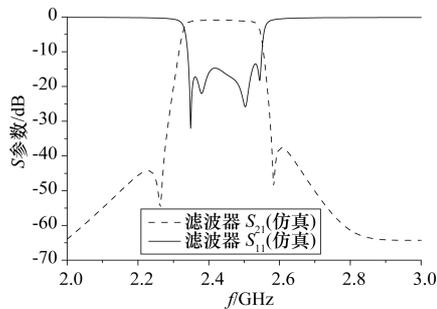
$$M = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (6)$$

图3显示了谐振器间距与耦合系数的关系,当 $s_{12} = 0.5$  mm, $s_{23} = 0.95$  mm, $s_{34} = 0.9$  mm, $s_{25} =$

图2 谐振器有载  $Q$  值与抽头位置  $d$  关系图3 谐振器间距  $s$  与耦合系数  $M$  关系图

1.65 mm时满足耦合系数。

将上述得到的参数进行建模,得到初始滤波器,再对各参量进行优化。图4是优化后滤波器的  $S$  参数图。滤波器通带为 2.35 ~ 2.55 GHz,回波损耗小于 -15 dB。通带外有两个传输零点,大约在 2.3 GHz和 2.6 GHz两个频率点上。滤波器边带非常陡峭,在带外 50 MHz处  $S_{21}$ 就下降到了 -50 dB。

图4 滤波器  $S$  参数曲线

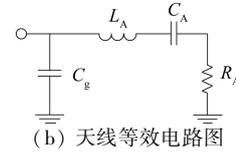
## 1.2 倒 L 天线设计

由于天线要替代滤波器的最后一个谐振器,所以天线需要与单个谐振器有相同的谐振特性,在这里最重要的是有相同的品质因数  $Q_A$ 。倒 L 天线是单极子天线的一种变形,可以等效为一个 RLC 串联谐振电路。图5为天线的结构图和等效电路图。 $R_A$  为天线的辐射电阻, $L_A$  和  $C_A$  为天线的谐振电感和电容。等效电路中增加了一个并联电容  $C_g$ ,这样可以是等效电路在更宽的带宽内与天线保持相同的阻抗特性<sup>[5]</sup>。

由等效电路可以得到天线的品质因数满足式



(a) 天线结构图



(b) 天线等效电路图

图5 天线结构图和天线等效电路图

(7)(可忽略  $C_g$  的影响):

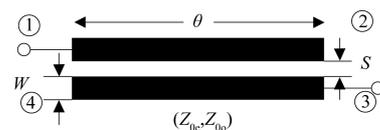
$$Q_A = \frac{2\pi f_0 L_A}{R_A} \quad (7)$$

本文求解品质因数的方法如下:1)对给定参数的倒 L 天线用 HFSS 进行仿真,得到  $S_{11}$  曲线;2)用 ADS 软件进行等效电路拟合,得到等效参数,代入公式得到品质因数;3)重复步骤 1)和 2),找到合适的天线尺寸。

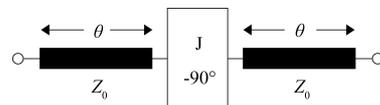
仿真发现与馈电线连接的垂直臂电流最强,所以其长度  $x_1$  决定了辐射电阻  $R_A$  和谐振电感  $L_A$ 。而天线的谐振频率  $f_0$  又由总长度决定,所以可以在保持总长度大致不变的情况下调节长度  $x_1$ ,直到满足品质因数。

## 1.3 滤波器天线集成

微带六阶交叉耦合带通滤波器和倒 L 天线设计好后,本文选用平行耦合线作为导纳变换器将滤波器和天线连接起来。耦合线及其等效电路如图6所示<sup>[9]</sup>。



(a) 结构图



(b) 等效电路图

图6 平行耦合线的结构图和等效电路图

利用奇偶模分析法对平行耦合线进行分析。为了使两种结构有相同的电性能,耦合线与其等效电路的  $ABCD$  矩阵应该相等。在电长度  $\theta = \pi/2$  时,可以推出下面的关系:

$$Z_{0e}/Z_0 = 1 + JZ_0 + (JZ_0)^2 \quad (8)$$

$$Z_{0o}/Z_0 = 1 - JZ_0 + (JZ_0)^2 \quad (9)$$

$$JZ_0 = 2FBW\theta / \sqrt{C_1 C_2} \quad (10)$$

$C_1$  和  $C_2$  是低通原型滤波器元件值,  $Z_{0e}$  和  $Z_{0o}$  是奇模和偶模阻抗。在给定  $Z_0$  的情况下,可求出奇模和偶模阻抗,平行耦合线的物理尺寸便可求得。经过整体仿真优化设计,最终的滤波器天线结构如图 7 所示,表 1 是滤波器天线具体的结构参数。

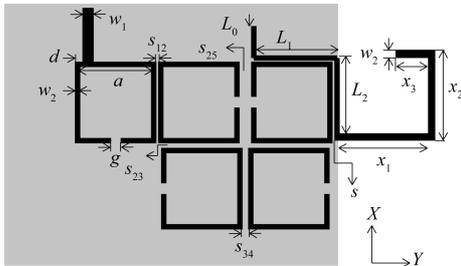


图 7 六阶微带滤波器天线结构

表 1 滤波器天线结构参数 mm

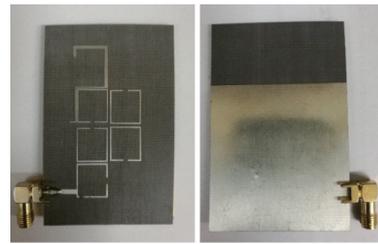
$w_1$	$w_2$	$w_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1.64	0.5	1.2	13	13.3	3.8
$L_0$	$L_1$	$L_2$	$g$	$d$	$a$
4.7	14.6	12.8	1.6	1	10.7
$s_{12}$	$s_{23}$	$s_{25}$	$s_{34}$	$s$	
0.45	0.9	1.75	0.95	0.19	

## 2 仿真与试验

本文用高频电磁仿真软件 HFSS17 进行仿真和优化,确定好尺寸后进行 PCB 板的加工。图 8 所示是滤波器天线的实物图。用矢量网络分析仪对滤波器天线进行了回波损耗的测试,在微波暗室中进行了滤波器天线的增益曲线和方向图的测试。

图 9 显示了滤波器天线的回波损耗和增益的仿真和测试结果。测试结果表明滤波器天线的回波损耗  $< -15$  dB,相对带宽在  $-10$  dB 条件下为 8% (2.37 ~ 2.57 GHz)。由于介质板介电常数、厚度偏差以及实际加工误差等因素,导致测试结果有较小的频率偏移。滤波器天线的增益在 2.45 GHz 为 1.6 dBi,略小于仿真值。通带内增益平缓,最大增益差只有 0.3 dBi。在通带边缘,可以看到两个传输零点,增益下降得特别快,在通带外 50 MHz 处增益就下降到了  $-25$  dB。在通带外,增益整体下降到了  $-20$  dB。

图 10 显示了滤波器天线在频率为 2.45 GHz 下的方向图。在  $xoz$  平面,辐射方向图几乎是全向的,最大增益为 1.6 dBi。在  $xoy$  平面有和单极子天线相似的 8 字形方向图。



(a) 正面 (b) 背面

图 8 滤波器天线实物图

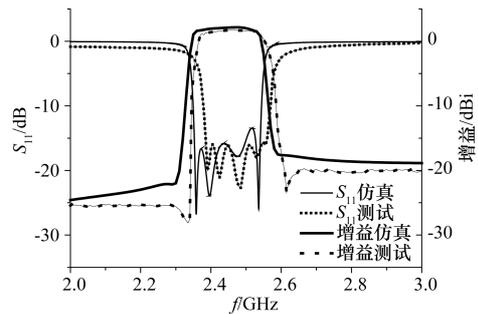
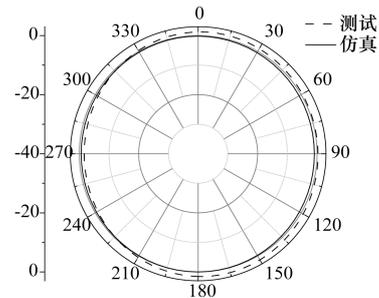
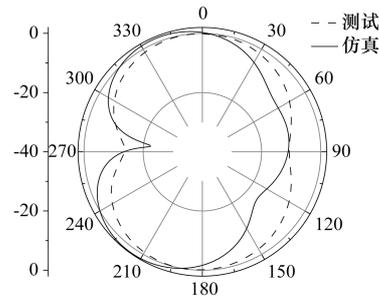


图 9 滤波器天线  $S_{11}$  和增益仿真测试图



(a)  $xoz$  平面



(b)  $xoy$  平面

图 10 滤波器天线方向图

## 3 结论

本文利用滤波器综合设计法设计了一种具有高带外抑制特性的微带六阶滤波器天线。滤波器天线由五个开口矩形谐振环、倒 L 天线和平行耦合线组成。倒 L 天线充当滤波器的最后一个谐振器。平行耦合线起导纳变换器的作用,将滤波器与天线耦合起来,保证天线起辐射作用的同时还作为滤波器的一个谐振单元。滤波器天线采用交叉耦合结构,在带外引入两个传输零点。经过仿真和测试,结果

表明本文设计的滤波器天线具有很好的边带陡峭性、良好的带外抑制特性和非常平缓的带内增益。由于天线替代了滤波器的一个谐振器,所以还减小了整体尺寸,降低了传输损耗。这些特性可以很好地应用于现代无线通信系统。

### 参 考 文 献

- [1] Froppier B, Mahe Y, Cruz E M, et al. Integration of a filtering function in an electromagnetic horn [A]. 2003 33rd European Microwave Conference [C], 2003. 939-942
- [2] Bailey M C. A stacked patch antenna design with strict bandpass filter characteristics (radiometer applications) [A]. Antennas and Propagation Society International Symposium [C], 2004. 1599-1602
- [3] Chuang C T, Chung S J. Synthesis and design of a new printed filtering antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(3):1036-1042
- [4] Wu W J, Yin Y Z, Zuo S L, et al. A new compact filter-antenna for modern wireless communication systems [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2011, 10(10):1131-1134
- [5] Yusuf Y, Cheng H, Gong X. A seamless integration of 3D vertical filters with highly efficient slot antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(11):4016-4022
- [6] Mansour G, Lancaster M J, Hall P S, et al. Design of filtering microstrip antenna using filter synthesis approach [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2014, 145(2):59-67
- [7] Shi J, Wu X, Chen Z N, et al. A compact differential filtering quasi-Yagi antenna with high frequency selectivity and low cross-polarization levels [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14(6):1573-1576
- [8] 陈军, 朱晓维, 居万晨. X波段微带交叉耦合带通滤波器的设计 [J]. 微波学报, 2014, 30(2):54-57  
Chen J, Zhu X W, Ju W C. Design of X band microstrip cross-coupled bandpass filter [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(2):54-57
- [9] Pozar D M. 微波工程: 第3版 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006  
Pozar D M. Microwave engineering: 3rd edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006
- 马 犇 男, 1994年生, 硕士。主要研究方向: 射频器件设计与电磁兼容技术。  
E-mail: maben1823@163.com
- 吴为军 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 滤波器与天线集成设计, 小型化天线设计, 电磁兼容仿真与设计。
- 陈 亮 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 电磁材料设计、电磁兼容技术。
- 肖 龙 男, 博士。主要研究方向: 电磁超构材料, 超高性能器件, 电磁兼容设计。
- (上接第59页)
- Zuo D J, Tang G, Qi Z B. Design scheme of 10MHz-1GHz small step frequency synthesizer in frequency hopping source [J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(S1):325-328
- [13] 罗兴华. 超宽带步进频雷达前段的实现及其相关问题研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014  
Luo X H. Research and development for UWB stepped frequency radar front-end [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014
- [14] 周俊杰. 超宽带脉冲雷达盲区问题的研究及仿真 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011  
Zhou J J. Study and simulation on blind zone in UWB pulse compression radar [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011
- [15] Analog Devices. 3.5 GSPS direct digital synthesizer with 12-Bit DAC: AD9914 datasheet [R]. USA: Analog Devices, 2012
- [16] 张小龙. 基于 AD9914 的 Ku 波段雷达测试频综模块的研究和实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014  
Zhang X L. Research and realization on Ku band radar testing frequency synthesizer module based on AD9914 [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014
- [17] 朱常峰. 基于 AD9910 的 Ku 波段雷达信号源的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014  
Zhu C F. Design and implementation of Ku-band radar signal source based on AD9910 [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014
- [18] Analog Devices. Synchronizing multiple AD9915 DDS-based synthesizers [R]. USA: Analog Devices, 2013
- 靳凌涛 男, 1990年生, 硕士生。主要研究方向: 雷达信号处理。  
E-mail: 245752243@qq.com
- 何松华 男, 1964年生, 博士, 教授。主要研究方向: 雷达信号与信息处理、精确制导。
- 欧建平 男, 1974年生, 博士, 副教授。主要研究方向: 雷达信号处理、FPGA应用。