

## Application of Half-Wave SIR-BPF in Harmonic Suppression \*

ZHANG Liming, FENG Quanyuan \*

(Southwest Jiaotong University, Institute of Microelectronics, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The problem of the basic structure, harmonic characteristics of the half-wavelength SIR-BPF and its application in harmonic suppression are analyzed in this article. Focusing on the structure of different impedance ratio, this paper discusses the choice principle of the impedance ratio in SIR-BPF design. After analysising of application in harmonic suppression, performance index of the design wide stopband band-pass filter that the first spurious response is more than  $2.5f_0$ , is achieved in two manner, using SIR with the same impedance ratio and the different. Finally, the design example is simulated and optimized by the ADS2008, which provide the feasibility for the physical Production.

**Key words:** SIR; Stripline; harmonic suppression; ADS

EEACC: 1270

## 半波长 SIR 带通滤波器在谐波抑制中的应用 \*

张立明, 冯全源 \*

(西南交通大学微电子研究所, 成都 610031)

**摘 要:** 分析了半波长 SIR-BPF 的基本结构、谐波特性和在谐波抑制中的应用问题, 重点探讨了不同阻抗比结构的 SIR-BPF 阻抗比的选择应该遵循的原则问题。然后用两种设计方式(相同阻抗比的 SIR 和不同阻抗比的 SIR)实现了宽阻带带通滤波器的设计, 第一次杂散响应在  $2.5f_0$  以上。最后利用 ADS2008 软件对设计实例进行了仿真和优化, 版图的实现为实物制作的提供了可行性。

**关键词:** 阶跃阻抗谐振器; 带状线; 谐波抑制; ADS

中图分类号: TN713.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2010)02-0226-05

随着电子战、卫星通信和个人移动通信等领域的迅速发展, 作为关键射频器件的滤波器的作用越来越重要。现代微波通信系统对带通滤波器的要求, 不仅仅是有良好的带内性能, 如较小的插损, 良好的匹配, 有衰减极点等, 而且要求其有良好的带外性能即有足够宽的阻带。特别是用在微波振荡器或放大器输出端的滤波器, 要求具有良好的谐波抑制性能<sup>[1]</sup>。

M. Makimoto 和 S. Yamashita 提出的应用阶梯阻抗谐振器 (SIR-Stepped Impedance Resonators) 构成滤波器, 通过调节新的设计参量 - 阻抗比  $K$ , 既能实现滤波器小型化的目的, 同时还可以实现抑制谐波提高阻带频率响应指标。另外, 虽然理论已经证明了四分之一波长 SIR 最适于微型化结构, 但在实际中, 半波长 SIR 比四分之一波长 SIR 用于更多的射

频器件。这是由于半波长 SIR 是由带状线结构组成, 允许有更广的几何结构, 且和有源器件有很好的兼容性<sup>[2]</sup>。

本文应用 SIR 结构特性分别设计了相同阻抗比和不同阻抗比的半波长 SIR 带状线平行耦合带通滤波器, 通过控制 SIR 的阻抗比, 控制各阶谐波通带的中心频率位置, 间接实现抑制谐波的目的。同时为了减小滤波器的体积, 所有组成滤波器的单元谐振器都采用了紧凑的夹夹形结构。

### 1 半波长 SIR-BPF 的设计原理

#### 1.1 半波长型 SIR-BPF 的基本结构

平行耦合开路端的半波长 SIR 被用来实现适合于 MIC 的 BPF。当采用 SIR 作为单元谐振元件时, 输入输出耦合和谐振器的级间耦合仍能通过相同的

项目来源: 国家自然科学基金资助 (10876029)

收稿日期: 2009-10-27 修改日期: 2009-11-15

平行耦合线实现,但耦合角并不限于  $\pi/4$  弧度。带状线平行耦合 BPF 的分布式耦合电路如图 1 所示,这一电路的电学参量由偶模阻抗  $Z_{oe}$  和奇模阻抗  $Z_{oo}$  及电耦合角  $\theta$  来表示<sup>[3]</sup>。

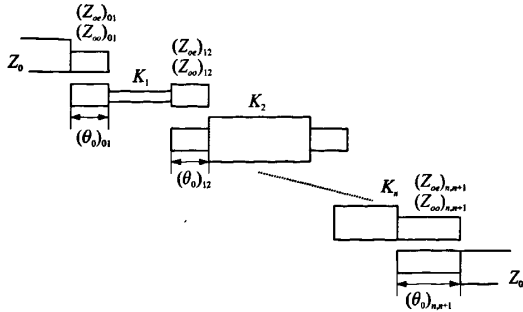


图 1 采用带状线 SIR n 级 BPF 的一般结构

可以看出,在阻抗比  $K=1$ ,电长度  $\theta_c = \frac{\pi}{2}$  这一特殊会情况下,SIR-BPF 就变成了 UIR-BPF。

如图 2 所示,平行耦合节可以等效为由两根单线和一个导纳反相器组成的等效电路。因此,只要制定被设计的滤波器的反相器参数,就可以确定平行耦合节的综合电学参数。

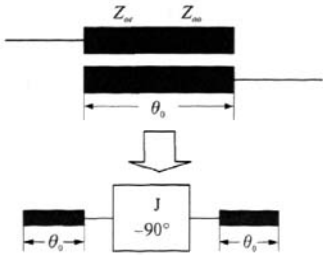


图 2 平行耦合带状线和它的等效电路电学参数

1.2 半波长型 SIR 谐波特性分析

半波长型 SIR 的基本结构如图 3 所示,现在取  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ,则从开路端看去,它的输入导纳为:

$$Y_i = jY_2 \frac{2(1+k)(k - \tan^2 \theta_0) \tan \theta}{k - 2(1+k+k^2) \tan \theta^2 + k \tan^4 \theta} \quad (1)$$

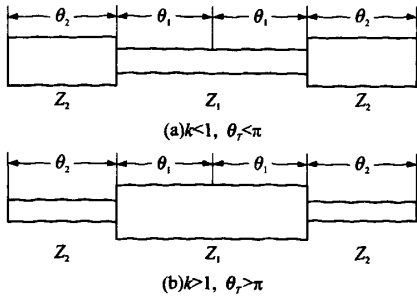


图 3 半波长 SIR 谐振单元

设杂散谐振频率为  $f_{SB1}f_{SB2}f_{SB3}$ ,对应的  $\theta$  为  $\theta_{S1} \theta_{S2} \theta_{S1}$ ,谐振时输入导纳  $Y_i = 0$ 。

于是:

第一杂散响应

$$\frac{f_{SB1}}{f} = \frac{\theta_{S1}}{\theta_0} = \frac{\pi}{2 \arctan \sqrt{k}} \quad (2)$$

第二杂散响应

$$\frac{f_{SB2}}{f} = \frac{\theta_{S2}}{\theta_0} = 2 \left( \frac{f_{SB1}}{f_0} \right) - 1 \quad (3)$$

第三杂散响应

$$\frac{f_{SB3}}{f} = \frac{\theta_{S3}}{\theta_0} = 2 \left( \frac{f_{SB1}}{f_0} \right) \quad (4)$$

可以看出,SIR 的杂散谐振频率受阻抗比  $K$  的控制,通过  $K$  的选取,可以改变寄生杂散谐振条件,使某些  $f_0$  的整数倍处出不产生寄生条件,得到宽阻带特性的 BPF 滤波器。

1.3 半波长型 SIR 在谐波抑制中的应用

半波长型平行耦合 SIR-BPF 一般有两种结构:一种结构是由相同阻抗比的单元 SIR 组成,如图 4 所示,其杂散谐振频率发生在由整数倍基频  $f_0$  衍生的频率上,这一特性对于抑制产生于非线性电路中的谐波成分的输出滤波器的设计是十分有价值的。

阻抗比的选择应满足:

$$K_{\max} = \left( \tan \frac{\pi}{2 \left( \frac{f_{SB1}}{f} \right)_{\min}} \right)^2 = \left( \tan \frac{\pi}{2 \left( \frac{\theta_{S1}}{\theta_0} \right)_{\min}} \right)^2 \quad (5)$$

这是根据第一次谐波出现位置的要求而求得的阻抗比  $K$  的最大值。一般情况下为了计算方便,可以适当选择  $K$ 。

另外一种结构是不同阻抗比的单元 SIR 组合的 BPF,通过改变多个 SIR 阻抗比来控制杂散谐振频率而又保持主谐振频率不变,主要应用于有宽阻带需求的抑制杂散频率响应的 BPF。在平行耦合线等分布耦合电路中,由电路的电特性和频率固有的依赖性可知,杂散响应的抑制在不同结构的 SIR-BPF 中得以提高。

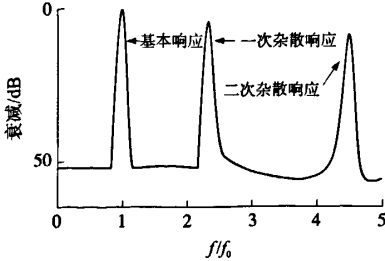


图 4 相同结构 SIR-BPF 传输响应

如图 5 所示,不同阻抗比的 SIR-BPF 可以看做由多个不同阻抗比的单元 SIR 级联而成,这些单元 SIR 具有共同的基本谐振频率,不同的杂散响应,级联后,可以有选择的将部分杂散谐振频率抑制。因此,不同结构的 SIR-BPF 能得到更好的杂散相应抑制和阻带扩展。

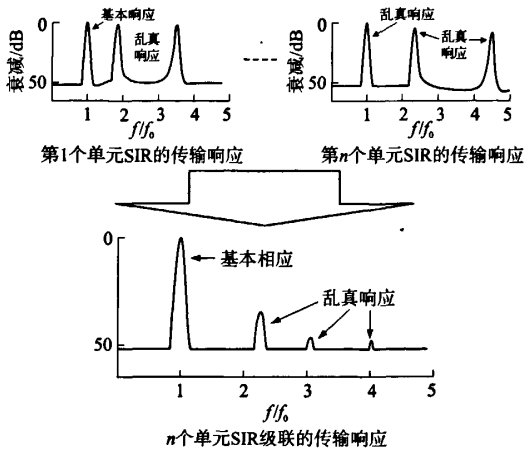


图 5 不相同阻抗比组合 SIR-BPF 的传输响应

在设计过程中,首先要考虑的是 SIR 的结构组成,但是目前不存在系统的方法由指定的杂散响应电平以确定合适组合。本节主要针对阻抗比的选择情况进行探讨。

根据“通过改变多个 SIR 阻抗比来控制杂散谐振频率而又保持主谐振频率不变”这一要求,阻抗比  $K$  的选择应该注意以下三点:

- (1) 各个耦合节的第一和第二次杂散响应应分散分布,不要重叠,以实现交互抑制;
- (2) 在满足谐波抑制的前提下,兼顾小型化,也就是选择尽可能小的阻抗比  $K$ ;
- (3) 阻抗比  $K$  的选择并不唯一,可以选取不同的组合进行设计,根据仿真结果确定最优组合。

2 SIR 滤波器设计

设计指标:通带 3.0 ~ 3.2 GHz,带内波动  $L \leq 0.01$  dB,带外抑制在  $f \geq 3.6$  GHz 或  $f \leq 3.6$  GHz 处大于 40 dB,杂散谐振频率  $f_s \geq 2.5f_0$ 。

2.1 设计指标分析

滤波器响应类型为切比雪夫,经计算级数为  $n=4$ ,相对带宽  $BW=6.25\%$ 。

(1) 相同结构的 SIR-BPF

根据第一杂散响应满足  $\frac{f_{SBI}}{f} = \frac{\theta_{S1}}{\theta_0} = \frac{\pi}{2 \arctan \sqrt{k}} \geq$

2.5 这一指标,取  $K=0.5$ ,则第一杂散响应  $\frac{f_{SBI}}{f} = \frac{\theta_{S1}}{\theta_0} = 2.55$ ,第二、三杂散相应分别为  $4.1f_0, 5.1f_0$ 。

(2) 对不同结构的 SIR-BPF

由平行耦合 BPF 结构的对称性,一般将对称的平行耦合节取相同的阻抗比。本设计中,为了满足第一寄生通带  $\frac{f_{SBI}}{f} = \frac{\theta_{S1}}{\theta_0} \geq 2.5$  这一指标,取第二和第三耦合节的阻抗比  $k=0.5$ ,杂散响应在  $2.55f_0, 4.1f_0, 5.1f_0, \dots$ 。对第一和第四耦合节,为了设计简便,取  $K=1$ ,其杂散响应相应发生在中心频率的整数倍  $2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, \dots$ 。由于耦合节的级联关系,只有不同结构 SIR 共有的或者距离比较近的杂散响应才会成为 SIR-BPF 的杂散响应,而其它他的杂散相应被抑制了。因此,最终得到的 SIR-BPF 仅有三个明显的杂散相应  $2.55f_0, 4.1f_0, 5.1f_0$ 。

2.2 电路仿真

为了使滤波器的结构紧凑,有利于实现小型化,所有组成滤波器的 SIR 单元均采用了发夹型结构<sup>[4]</sup>。在 ADS 中建立电路原理图如图 6 所示。

选择衬底材料如下。

衬底材料 玻璃纤维薄片

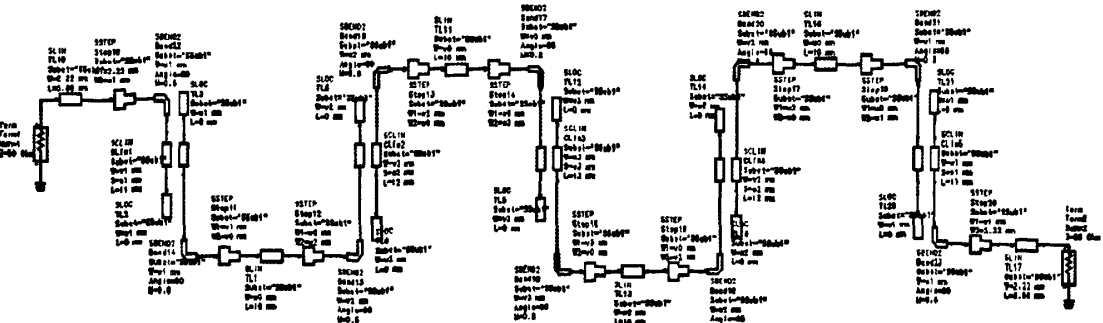


图 6 设计的相同和不同 SIR 结构的滤波器原理图

相对介电常数  $E_r=2.6$

衬底高度  $H=3.13\text{ mm}$

中心导体厚度  $t=0.018\text{ mm}$

损耗角  $\text{Tand}=1\text{e}-3$

为了获得更加准确的滤波器结构,在滤波器的

设计过程中,利用仿真软件 ADS2008 对初始设计参数进行了优化<sup>[4]</sup>,设计的 SIR-BPF 的初始设计尺寸和优化后的尺寸如表 1 所示,优化后的仿真结果如图 7 所示。

表 1 初始设计和优化后的平行耦合线设计参数

BPF	奇/偶模阻抗		线宽 W/mm		耦合间隙 S/mm		偶和长度 L/mm	
相同 SIR	$(Z_{oe})_{01}=(Z_{oe})_{45}=108.6$	$(Z_{oo})_{01}=(Z_{oo})_{45}=34.35$	0.94	0.97	0.057	0.137	5.88	5.87
结构的	$(Z_{oe})_{12}=(Z_{oe})_{34}=58.65$	$(Z_{oo})_{12}=(Z_{oo})_{34}=43.6$	2.09	2.186	0.727	0.748	5.88	5.04
BPF	$Z_{oe23}=56.1$	$(Z_{oo})_{23}=45.1$	2.15	2.07	0.99	0.843	5.88	4.2
不同 SIR	$(Z_{oe})_{01}=(Z_{oe})_{45}=90.85$	$(Z_{oo})_{01}=(Z_{oo})_{45}=37.55$	1.235	1.19	0.1226	0.3	7.5	8.97
结构的	$(Z_{oe})_{12}=(Z_{oe})_{34}=58.65$	$(Z_{oo})_{12}=(Z_{oo})_{34}=43.6$	2.09	1.89	0.727	0.98	5.88	5.99
BPF	$(Z_{oe})_{23}=56.1$	$(Z_{oo})_{23}=45.1$	2.15	2.01	0.99	1.04	5.88	6.22

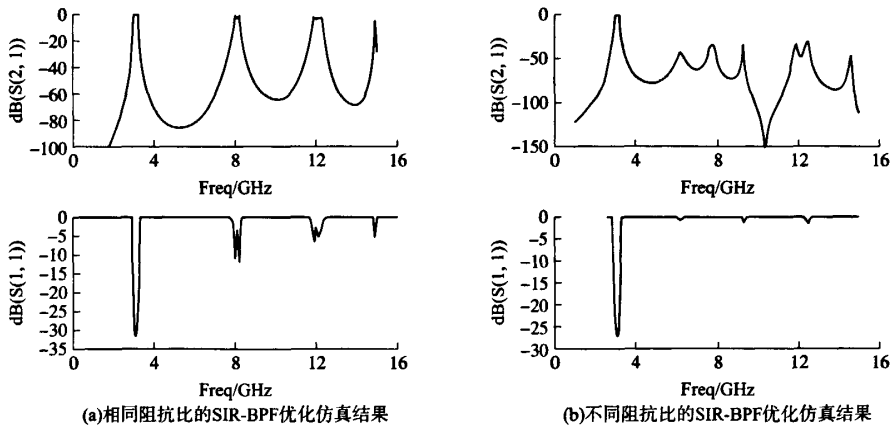


图 7

可以看出:相同阻抗比的 SIR-BPF 其杂散响应出现在  $2.55f_0$ 、 $5.1f_0$ ,在  $2f_0$  处并没有出现寄生通带,说明阻带已经扩展到  $2.5f_0$ ,仿真结果和理论分析是一致的;不同阻抗比的 SIR-BPF 其杂散响应是由多个 SIR 的杂散响应组合而成的,分散在  $2f_0$ 、 $2.55f_0$ 、 $3f_0$ 、 $4.1f_0$  处,虽然在  $2f_0$  处出现了寄生通带,但是其传输响应已经下降到了  $-45\text{ dB}$  以下,还是满足设计指标的,并且,和相同阻抗比的 SIR-BPF 相比,它所有杂散响应的传输函数都比较低,这是由于不同 SIR 的谐波相互抑制作用产生的。

2.3 Momentum 电磁仿真

版图的仿真是采用 Momentum (矩量法) 直接对电磁场进行计算,其结果比在原理图中仿真要更加接近实物的响应。一般情况下,由原理图直接生成的版图仿真得到的曲线不满足指标要求,产生这种情况的原因是相邻耦合线节间的线宽相差过大或者其它的参数取值不合适。本文的做法是根据曲线与指标的差别情况,适当调整优化目标的参数,重新对原理图进行优化仿真。重复版图——原理图——版

图的优化过程,直到版图仿真的结果达到要求。

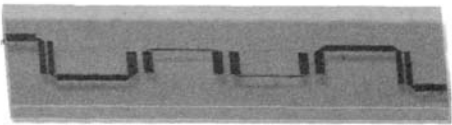


图 8 三维版图俯视图

最终得到 Momentum 电磁仿真结果如图 9 和图 10 所示。

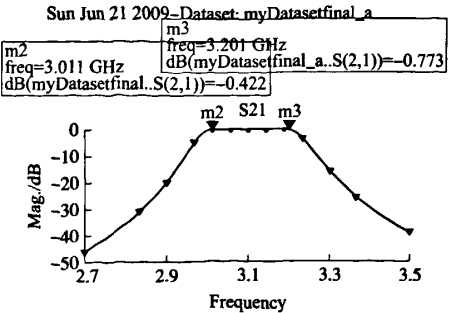


图 9 正向传输系数仿真曲线

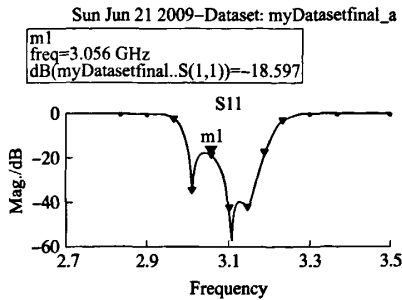


图 10 输入端口反射系数仿真曲线

3 结论

本文介绍了半波长 SIR-BPF 的设计原理和设计步骤,对其谐波抑制原理进行了分析,并且讨论了相同阻抗比和不同阻抗比这两种结构的 SIR-BPF 传输响应,目的是说明根据不同的应用背景,可以选择不

同的结构来达到抑制杂散响应的目的对于不同阻抗比的 SIR-BPF,其阻抗比  $K$  的组合并不唯一,而是根据实际应用而有多种选择,使用这种结构可以得到更好的传输响应,但是设计过程要相对复杂一些。

参考文献:

- [1] Cristal E G, Frankel S. Hairpin-Line and Hybrid Hairpinline/ Half-Wave Parallel-Coupled-Line Filters[ J]. IEEE Trans Micro-wave Theory Tech, 1972, 20: 719 ~ 728.
- [2] Makimoto M, Yamashita S. 无线通信中的微波谐振器与滤波器[ M]. 赵宏锦,译. 北京:国防工业出版社,2002.
- [3] 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.
- [4] Agilent Technologies. “Line Calc Program” Advanced Design System ver. 1.3, Palo Alto, CA, November 1999.
- [5] Nikholas G. Practical Techniques for Designing Microstrip Tapped Hairpin Resonator Filters on FR4 Laminates[ M]. Toledo, 2001.



张立明(1983 - ),男,硕士研究生,研究方向为射频与微波滤波器的设计;



冯全源(1963 - ),男,博士生导师,研究方向为 RFID 技术,微波及毫米波技术,微波器件及材料。

## 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/>