

文章编号:1000-582X(2011)06-042-04

小型发夹型 SIR 微带带通滤波器的设计

陈林^a, 林杰^b, 王保华^b

(重庆大学 a. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室; b. 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要:针对高性能射频滤波器结构复杂、尺寸大的问题,基于阶梯阻抗谐振器设计制作了一个中心频率为 2.45 GHz 的小型发夹型微带带通滤波器。通过把半波长阶梯阻抗谐振器耦合结构折合成“U”字形,即发夹型结构改善了滤波器性能和缩小了滤波电路尺寸。通过软件仿真和对制作的硬件电路测试的结果表明,设计制作的滤波器在 2.42 GHz 到 2.48 GHz 范围内的插入损耗小于 2 dB,3 dB 带宽为 130 MHz,中心频率的回波损耗达到了 30 dB,直流到 2 GHz 以及 2.8 GHz 到 11 GHz 频率范围的阻带衰减都大于了 30 dB。因此,该滤波器有效地抑制了寄生通带,而且结构简单、尺寸也小于 26 mm×22 mm。

关键词:阶梯阻抗谐振器;带通滤波器;寄生通带;发夹型;阻带抑制**中图分类号:** TN 713**文献标志码:** A

Design of a compact hairpin microstrip bandpass filter using SIR

CHEN Lin^a, LIN Jie^b, WANG Bao-hua^b(a. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology;
b. College of Communication Engineering, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Because of high performance filters' complicated structure and big dimension, a compact hairpin microstrip bandpass filter centered at 2.45 GHz is designed and developed based on stepped impedance resonator (SIR). The performance of the filter is improved and the dimension is reduced by kinking the half wavelength SIRs coupling structure to 'U' shape, which is hairpin. The results of simulation and measurement of the PCB demonstrate that the insert loss is less than 2 dB in the frequency domain from 2.42 to 2.48 GHz, the 3 dB bandwidth is 130 MHz, the return loss in the middle frequency is as high as 30 dB, and the stop band suppression is bigger than 30 dB in the frequency domain from DC to 2 and 2.8 to 11 GHz. It can be seen that this filter not only suppresses the spurious band effectively, but also have simple and small structure with dimension smaller than 26 mm×22 mm.

Key words: SIR; bandpass filter; hairpin; spurious band; stop band suppression

无线通信系统的广泛应用使得研究具有小尺寸与高性能特点的微波带通滤波器具有非常重大的意义。微带带通滤波器具有加工简单、成本低、适宜与其他器件的集成以及适合批量加工等特点,

但是由于其分布参数传输线的本质,滤波器的频率响应在主通带的整数倍上都会出现寄生通带。而阶梯阻抗谐振器 (stepped impedance resonator, SIR) 结构的特点就在于通过改变其阻抗比,不仅

收稿日期: 2010-11-20**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61001089);重庆市自然科学基金资助项目(2010BB2049)**作者简介:** 陈林(1980-),男,重庆大学博士研究生,输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,主要从事无线通信系统、扩频通信、雷电定位监测等的研究,(Tel)023-65111171;(E-mail)clin@cqu.edu.cn。

可以减小尺寸,还可调整寄生通带的位置从而改善阻带性能。^[1-2]

文献[3-11]都通过利用 SIR 结构来设计滤波器并获得了相当宽的阻带范围,文献[4]和文献[5]设计的滤波器的阻带范围分别达到了 8.2 倍和 11.4 倍中心频率。但是它们的阻带抑制并不理想,文献[3]只达到了 20 dB,且设计比较复杂,其他几篇文献采用的结构要不就是很复杂,要不就是尺寸偏大,要不还需要打孔,这在工程上是不容易实现的。文献[12]通过级联阶梯阻抗发夹线谐振器构成的椭圆函数低通滤波器于带通滤波器的输入/输出端,虽然改善了阻带抑制特性,但是也相应加大了电路的尺寸。

笔者基于 SIR 设计了一种结构简单、小型的发夹型微带带通滤波器。发夹型滤波器是半波长耦合微带滤波器的一种变形结构,是把半波长耦合结构折合成“U”字形的结构^[12-15]。因此,相对于其他滤波器结构,发夹型 SIR 滤波器具有更加紧凑的电路结构,尺寸小,而且还能很好地抑制寄生通带。

1 SIR 谐振器

1.1 SIR 的基本结构

SIR 的基本结构如图 1 所示^[2],为非等电长度半波长结构,由特征阻抗分别为 Z_1 和 Z_2 (导纳为 Y_1 和 Y_2) 的传输线组成。两段传输线对应电长度为 θ_1 和 θ_2 ,谐振器的总电长度为

$$\theta_T = 2(\theta_1 + \theta_2)。 \quad (1)$$

阻抗比是表征 SIR 的一个重要电参数,定义为

$$K = Z_2/Z_1。 \quad (2)$$

电长度比定义为

$$\alpha = \frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2} = \frac{\theta_2}{\theta_T} = \frac{2\theta_2}{\theta_T}。 \quad (3)$$

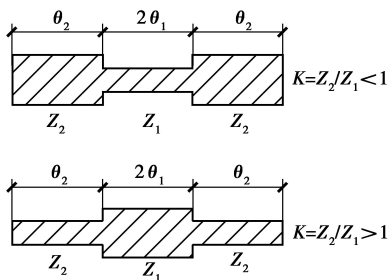


图 1 半波长 SIR 的基本结构

1.2 谐振条件

如果忽略 SIR 结构中的阶跃非连续性和开路端

的边缘电容,从开路端看的输入导纳 Y_i 为

$$Y_i = jY_2 [2(K \tan \theta_1 + \tan \theta_2) \cdot (K - \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2)] / [K(1 - \tan^2 \theta_1) \cdot (1 - \tan^2 \theta_2) - 2(1 + K^2) \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2]。 \quad (4)$$

设主通带中心频率为 f_0 ,当工作频率 $f = f_0$ 时,SIR 谐振,则有

$$Y_i = 0。 \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得谐振条件为

$$K - \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2 = 0。$$

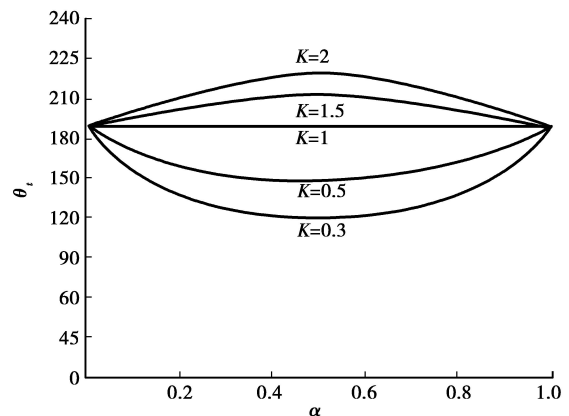
即

$$K = \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2。 \quad (6)$$

将 θ_T 与 θ_1 、 θ_2 的关系式(3)代入式(6)则有

$$\tan \left[(1 - \alpha) \frac{\theta_T}{2} \right] \cdot \tan \left(\alpha \frac{\theta_T}{2} \right) = K。 \quad (7)$$

由式(7)可以看出,谐振条件将取决于阻抗比 K 与电长度比 α 的选取,如图 2 所示。通常在设计中如果希望得到窄通带和宽阻带特性,可选择 $K < 1$;而如果希望得到小的插入损耗,则可选择 $K > 1$ 。



阻抗比 K 分别取为 0.3、0.5、1、1.5、2

图 2 谐振电长度 θ_r 与电长度比 α 的关系

1.3 杂散谐振频率

由式(7)可推导出这种情况下第 m 个谐振模将出现在 m 倍的半波长处,第 2 谐振频率即第一杂散谐振频率与基本谐振频率之比为 2。在后面的分析中,令基本谐振频率为 f_0 ,其对应的总谐振电长度为 θ_0 ,杂散谐振频率为 f_m ($m=1,2,3,\dots$),与其对应的谐振电长度为 θ_m ($m=1,2,3,\dots$)。

假设 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$,则式(4)简化为

$$Y_i = jY_2 \frac{2(1+K) \cdot (K - \tan^2 \theta)}{K - 2(1+K+K^2)\tan^2 \theta + K \tan^4 \theta}。 \quad (8)$$

由式(5)和式(8)可得

$$\left. \begin{aligned} \theta_{s1} &= \pi/2, \\ \theta_{s2} &= \tan^{-1}(-\sqrt{K}) = \pi - \theta_0, \\ \theta_{s3} &= \pi. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这样就有

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{s1}}{f_0} &= \frac{\theta_{s1}}{\theta_0} = \frac{\pi}{2 \tan^{-1} \sqrt{K}}, \\ \frac{f_{s2}}{f_0} &= \frac{\theta_{s2}}{\theta_0} = 2 \left(\frac{f_{s1}}{f_0} \right) - 1, \\ \frac{f_{s3}}{f_0} &= \frac{\theta_{s3}}{\theta_0} = 2 \left(\frac{f_{s1}}{f_0} \right). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

从图 2 中可以发现,对于非阶梯阻抗谐振情况 ($K=1$ 或者 $\alpha=0,1$), $\theta_T = \pi$, 但是当 $K < 1$ 时, 式 (10) 中第一个比值将大于 2, 即第一杂散谐振频率大于基本谐振频率的 2 倍。SIR 就是利用这个原理通过调整阻抗比来改变杂散谐振频率从而改善阻带性能的。对于非等电长度的 SIR 而言, 杂散谐振频率会相对式 (10) 所计算出的频率有所改变。也就是说, 可以通过调整阻抗比 K 与电长度比 α 来调整杂散谐振频率, 从而达到抑制寄生通带的目的。

2 发夹型 SIR 滤波器的设计

基于 SIR 设计了一个中心频率为 2.45 GHz 的发夹型 SIR 微带带通滤波器, 相对带宽 FBW 取为 3%, 以 2 阶 0.1 dB 波纹切比雪夫滤波器为设计原型 $g_1=0.8430$, $g_2=0.6220$, $g_3=1.3554$, 通过文献[1]中给出的发夹型微带带通滤波器的设计公式来计算出耦合系数 k 和外部品质因数 Q_e

$$\left. \begin{aligned} Q_{e1} &= \frac{g_0 \cdot g_1}{\text{FBW}}, \\ Q_{eN} &= \frac{g_N \cdot g_{N+1}}{\text{FBW}}, \\ k_{i,i+1} &= \frac{\text{FBW}}{\sqrt{g_i \cdot g_{i+1}}}, i = 1, \dots, N-1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

经计算得, $Q_{e1}=Q_{eN}=28.1$, $k=0.04$ 。

当 2 个相同的谐振器的谐振频率都为 f_0 , 把它们放在相邻的位置时会由于相互耦合作用而使得谐振频率分别为 f_1 和 f_2 , 因此, 新的谐振频率可以用来确定耦合系数

$$k = \pm \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2}. \quad (12)$$

仿真时, 基板材料选为聚四氟乙烯, 其介电常数为 2.55, 损耗正切为 0.0011, 厚度取为 0.8 mm。微带 SIR 谐振器的阻抗比 K 取为 0.39, 电长度比 α 取为 0.45。经严格计算所获得的滤波器电路如图 3 所示, 在 Ansoft 公司的 HFSS 软件中进行仿真与优化。同时可根据文献[16]中给出的仿真方法以及式

(12) 得到相应的耦合尺寸。耦合系数 k 与耦合距离 S_2 的关系如图 4 所示。

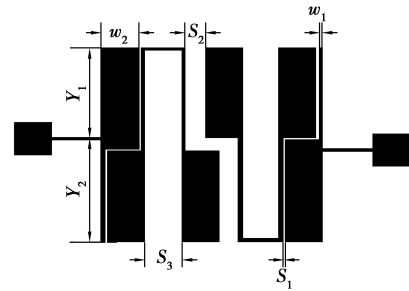


图 3 发夹型 SIR 微带带通滤波器

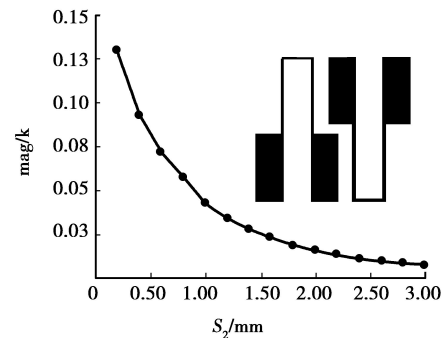


图 4 耦合系数 k 与耦合距离 S_2 的关系

3 分析和测试结果

所设计的发夹型 SIR 滤波器尺寸小于 $26 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$, 仿真结果如图 5 所示。从图中可以看到, 在 2.42 GHz 到 2.48 GHz 范围内的插入损耗小于 2 dB, 3 dB 带宽为 130 MHz, 而在中心频率的回波损耗达到了 30 dB, 直流到 2 GHz 以及 2.8 GHz 到 11 GHz 频率范围的阻带衰减都大于了 30 dB, 3.1 GHz 到 6.3 GHz 以及 6.7 GHz 到 11 GHz 频率范围内的衰减更是大于了 40 dB。第一杂散谐振频率和第二杂散谐振频率分别出现在 7.27 GHz 和 11.5 GHz 处, 且衰减分别大于 30 dB 与 12 dB, 由此可见低阶杂散谐振得到了很好的抑制。事实上, 由式 (10) 计算出的第一杂散谐振频率和第二杂散谐振频率分别为 6.7 GHz 和 12.9 GHz, 可见杂散谐振频率的仿真结果与理论值基本吻合。同理, 从图中还可以看出第三杂散谐振频率在 14 GHz, 与理论值的 13.7 GHz 也是基本一致的。实物图与测试结果如图 6 所示。

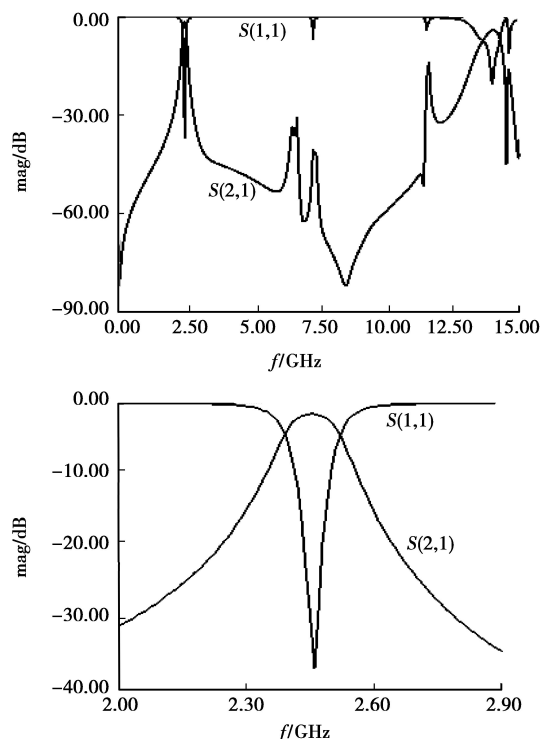


图 5 发夹型 SIR 滤波器仿真结果

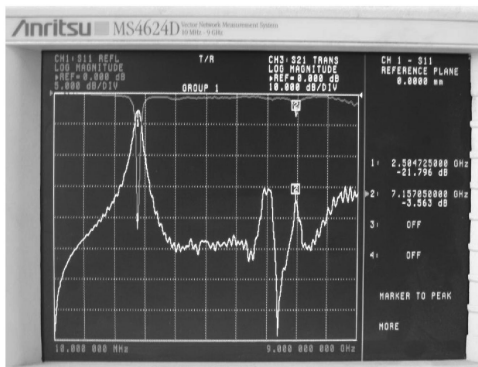
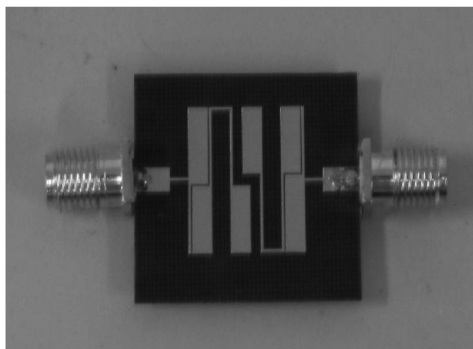


图 6 发夹型 SIR 滤波器实物及测试结果

4 结 论

笔者设计的发夹型 SIR 滤波器不仅能很好地抑制寄生通带,得到较宽的阻带带宽,而且实现了结构

简单和小型化的目的。仿真曲线和测试波形也近似吻合,证明了本设计的有效性和实用性。但是也可以看出本设计还缺乏输入输出耦合的理论分析,这也是今后努力的方向。

参考文献:

- [1] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/Microwave applications[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 2001.
- [2] MAKIMOTO M, YAMASHITA S. Bandpass filters using parallel coupled stepped impedance resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1980, 28(12): 1413-1417.
- [3] 李平辉, 赵亮, 崔志富, 等. 一种新型寄生通带抑制结构[J]. 微波学报, 2008, 24(4): 77-79.
LI PING-HUI, ZHAO LIANG, CUI ZHI-FU, et al. A novel configuration with spurious responses suppression[J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(4): 77-79.
- [4] CHEN C F, HUANG T Y, WU R B. Design of microstrip bandpass filters with multiover spurious-mode suppression[J]. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 2005, 53(12): 3788- 3793.
- [5] LIN S C, DENG P H, LIN Y S, et al. Wide-stopband microstrip bandpass filters using dissimilar quarter-wavelength stepped-impedance resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(3): 1011-1018.
- [6] WU T, TANG X H, XIAO F. Research on the parasitic passband suppression of microstrip stepped impedance resonator filters[C]// Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components, 2008, December 14-15, 2008, Chengdu, China. [s. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2009-02-13].
- [7] LU J C, CHANG C Y. Quarter-wave stepped-impedance resonator filters with quadruplet and canonical form responses[C] // 38th European Microwave Conference, 2008, October 27-31, 2008, Amsterdam. [s. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2009-01-19].
- [8] SHEN W, SUN X W, YIN W Y. A novel microstrip filter using three-mode stepped impedance resonator (TSIR)[J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2009, 19(12): 774-776.
- [9] KONGPOP U, WOLLACK E J, DOIRON T, et al. A bandpass filter design using half-wavelength stepped impedance resonators with internal couplings[J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2006, 16(8): 443-445.

(下转第 50 页)

- bio-fuels and blends with diesel fuel [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3): 589-595.
- [6] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明, 等. 非直喷式增压柴油机燃用生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机工程, 2006, 24(2): 110-115.
- TAN PI-QIANG, HU ZHI-YUAN, LOU DI-MING, et al. Performance and emissions of IDI turbocharged diesel engines fuelled with biodiesel fuels[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 24(2): 110-115.
- [7] 司利增, 边耀璋, 蔡永江. 柴油机燃用生物柴油的特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 83-85.
- SI LI-ZENG, BIAN YAO-ZHANG, CAI YONG-JIANG. Performances of diesel engine fueled with biodiesel [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 83-85.
- [8] TAT M E. Investigation of oxides of nitrogen emission from biodiesel-fueled engines [D]. Ames: Iowa State University, 2003.
- [9] LIN C Y, WANG K H. Diesel engine performance and emission characteristics using three-phase emulsions as fuel[J]. Fuel, 2004, 83: 537-545.
- [10] KASS M D, LEWIS S A, SWARTZ M M, et al. Utilizing water emulsification to reduce NOx and particulate emissions associated with biodiesel[J]. Transactions of the ASABE, 2009 52(1): 5-13.
- [11] 叶丽华, 袁银南, 孙平, 等. 柴油机燃用多种燃料的性能与排放特性[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2010, 31(2): 155-159.
- YE LI-HUA, YUAN YIN-NAN, SUN PING, et al. Performance and emission characteristics of diesel engine with different fuels[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(2): 155-159.
- [12] FERNANDO S, HANNA M. Phase behavior of the ethanol-biodiesel-diesel micro-emulsion system[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(3): 903-908.
- [13] 倪良, 蒋文华, 韩世钧. 用相平衡理论研究微乳液的形成机理[J]. 石油化工, 2000, 10: 750-753.
- NI LIANG, JIANG WEN-HUA, HAN SHI-JUN. Mechanism of formation of micro-emulsions based on the theory of phase equilibrium[J]. Petrochemical Technology, 2000, 10: 750-753.
- [14] QI D H, CHEN H, MATTHEWS R D, et al. Combustion and emission characteristics of ethanol-biodiesel-water micro-emulsions used in a direct injection compression ignition engine[J]. Fuel, 2010, 89(5): 958-964.
- [15] 陈昊, 祁东辉, 边耀璋. 柴油机燃用生物柴油-乙醇-水微乳燃料性能研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(1): 21-26.
- CHEN HAO, QI DONG-HUI, BIAN YAO-ZHANG. Study on performance of diesel engine fuelled with biodiesel-ethanol-water-emulsion fuel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(1): 21-26.

(编辑 张小强)

(上接第45页)

- [10] MOKHTAARI M, BORNEMANN J, AMARI S. Folded compact ultra-wideband stepped-impedance resonator filters [C]// Microwave Symposium, 2007. IEEE/MTT-S International. June 3-8, 2007, Honolulu, HI, [S. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2007-07-02].
- [11] HSU C L, KUO J T. A two-stage SIR bandpass filter with an ultra-wide upper rejection band[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(1): 34-36.
- [12] 毛睿杰, 唐小宏, 王玲. 宽阻带阶跃阻抗夹线带通滤波器设计[J]. 微波学报, 2007, 23(1): 36-42.
- MAO RUI-JIE, TANG XXIAO-HONG, WANG LING. A bandpass filter with broad stopband using stepped impedance hairpin resonators[J]. Journal of Microwaves, 2007, 23(1): 36-42.
- [13] CHOI S U, CHUNG M S, YUN S W. Hairpin tunable bandpass filter with improved selectivity and tunability[C] // Asia-Pacific Microwave Conference, 2007. December 11-14, Bangkok. [s. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2008-06-27].
- [14] MOON H U, CHOI S U, CHO S W, et al. Size-reduced tunable hairpin bandpass filter using aperture coupling with enhanced selectivity and constant bandwidth [C] // 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. June 15-20, 2008, Atlanta, GA. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2008-09-26].
- [15] 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.
- GAO YUAN, DENG ZHONG-LIANG. Design of microstrip hairpin bandpass filter [J]. Electromagnetic Field and Microwave, 2008, 38(4): 40-42.
- [16] 张羽, 帐淑娥. 微带滤波器级间耦合系数的计算方法[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(5): 80-85.
- ZHANG YU, ZHANG SHU-E. Calculation of interstage coupling coefficient of microstrip filter[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(5): 80-85.

(编辑 张小强)