

一种基于耦合矩阵的微带线带通滤波器的设计方法

李胜先^{1,2}, 傅君眉¹, 吴须大²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安空间无线电技术研究所, 710100, 西安)

摘要: 提出了一种微带线带通滤波器的分步式设计方法, 首先根据电性能指标得出耦合矩阵, 然后采用谐振器、电耦合以及磁耦合等不同结构实现耦合矩阵的各个单元. 该方法可直接综合出对称特性、非对称特性类椭圆函数滤波器的耦合矩阵, 不仅适用于微带类椭圆函数滤波器的设计, 也可应用到同轴腔、圆柱腔等形式滤波器的设计中. 设计并研制了一台 S 波段 180 MHz 带宽的 6 阶微带类椭圆函数滤波器, 带内损耗起伏小于 2.5 dB, 1 957 MHz 及 2 327 MHz 处的抑制大于 55 dB, 测试结果与设计值吻合较好, 证实方法简单有效.

关键词: 微带线; 带通滤波器; 耦合矩阵; 综合; 设计方法

中图分类号: TN830.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)06-0679-04

Design Method for Microstrip Bandpass Filters Based on Coupling Matrix

Li Shengxian^{1,2}, Fu Junmei¹, Wu Xuda²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

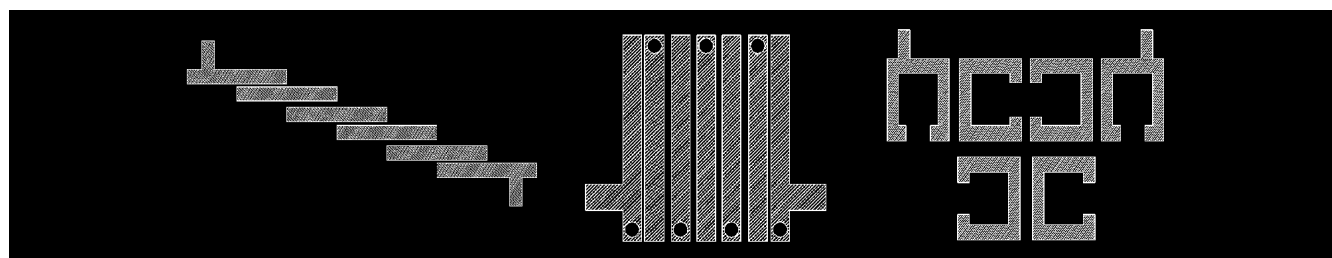
Abstract: A multi-step design method for microstrip bandpass filters is presented. Firstly, a coupling matrix is obtained through the electric performance requirements of the bandpass filter. Secondly, different structures such as resonators, electric coupling and magnetic coupling are used to realize each unit of the coupling matrix. The method can directly synthesize the coupling matrix for symmetric and asymmetric quasi-elliptic function filter, not only suitable for designing microstrip bandpass filter, but also for designing coaxial or cylindrical cavity filter. An S-band 6-pole quasi-elliptic function microstrip filter is designed and realized with 180 MHz bandwidth, and its performances are as follows: the loss variation within band is less than 2.5 dB, the rejection at 1 957 MHz and 2 327 MHz is more than 55 dB, and the measured data agree well with the predicted values. The design method is proved simple and valid.

Keywords: microstrip; bandpass filter; coupling matrix; synthesis; design method

微带滤波器具有体积小、结构简单、加工方便、可靠性高等优点, 在星载微波变频器、放大器等有源设备中广泛应用. 微带线带通滤波器主要有平行耦合线式、交指线式、交叉耦合式等形式, 如图 1 所示, 其中平行耦合线式和交指线式滤波器可实现 Che-

byshev 特性, 而交叉耦合式滤波器可实现类椭圆函数特性, 在保证带内特性的同时, 可获得比 Chebyshev 更好的带外抑制特性. 近年来已出现上述类型的一些改进形式^[1-4].

目前已有较成熟的 Chebyshev 特性滤波器的设



(a)平行耦合线式

(b)交指线式

(c)交叉耦合式

图1 微带线带通滤波器外形

计理论和设计方法^[5],但交叉耦合的类椭圆函数滤波器的设计仍是微波工程的一个重要研究课题^[1,6-11].

本文提出一种能同时适用 Chebyshev 特性和类椭圆函数特性滤波器的通用的设计方法,该方法具有分步式的特点:首先,通过网络综合的方法将滤波器的技术指标转化为耦合矩阵;然后,以合适的结构形式实现耦合矩阵各个单元,完成滤波器的设计.

本文方法的另一个特点是可直接综合出对称特性、非对称特性类椭圆函数滤波器的耦合矩阵,不仅适用于微带类椭圆函数滤波器的设计,也可应用到同轴腔、圆柱腔等形式滤波器的设计中.

1 原理

n 阶微带线带通滤波器是一个具有 n 个谐振器的网络,其反射函数 $S_{11}(\omega)$ 和传输函数 $S_{21}(\omega)$ 可以表示为一个 n 阶的有理多项式^[12]

$$S_{11}(\omega) = \frac{F_n(\omega)}{E_n(\omega)}, \quad S_{21}(\omega) = \frac{P_n(\omega)}{\epsilon E_n(\omega)} \quad (1)$$

式中: $F_n(\omega)$ 和 $P_n(\omega)$ 均是分子多项式; $E_n(\omega)$ 为分母多项式; ω 为角频率; ϵ 为常数,它与 $\omega = \pm 1$ 时 S_{21} 的等波纹数值相关

$$\epsilon = \frac{1}{(10^{L_R/10} - 1)^{1/2}} \left. \frac{P_n(\omega)}{F_n(\omega)} \right|_{\omega=1} \quad (2)$$

其中 L_R 是预设的带内返回损耗.

作为无耗网络,满足能量守恒原理,由此得到

$$S_{21}^2(\omega) = \frac{1}{1 + \epsilon^2 C_n^2(\omega)} \quad (3)$$

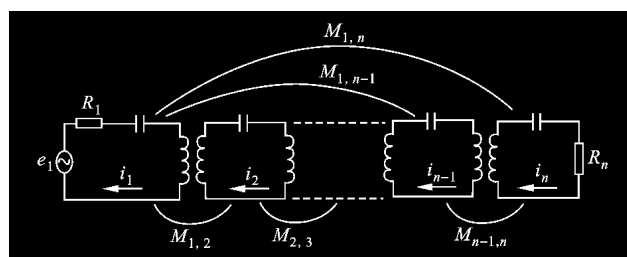
式中

$$C_n(\omega) = \frac{F_n(\omega)}{P_n(\omega)} \quad (4)$$

为滤波器的特征函数,可以是 Butterworth 函数、Chebyshev 函数或 elliptic 函数等. 在满足带内等波纹的前提下,若在带外设置若干个有限频率的传输零点,则滤波器特性就变成类椭圆函数特性. 文献

[12]给出了这种特性滤波器特征函数的构造方法.

根据反射函数和传输函数,运用网络综合的理论得到输入输出耦合系数 $R = [R_1 \ R_n]$ 和耦合矩阵 $M = \{M_{uv} | u=1, \dots, n, v=1, \dots, n\}$ ^[12-13],产生如图2所示的等效电路.



R_1 为输入耦合系数; R_n 为输出耦合系数; M_{uv} ($u=1, \dots, n$, $v=1, \dots, n$) 为谐振器 u 、 v 之间的耦合系数; $i_1, \dots$,

i_n 为谐振回路上电流; e_1 为激励源

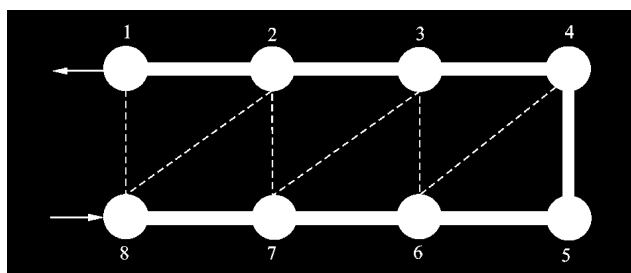
图2 带通滤波器的等效电路

输入输出耦合系数 R_1 、 R_n 及耦合矩阵 M 的物理意义如下: R_1 、 R_n 分别对应滤波器的输入端口、输出端口与相邻谐振器的耦合; M 表示谐振器之间的耦合,对于对称特性的滤波器,耦合矩阵单元 M_{uu} 为 0,而对于非对称特性滤波器, M_{uu} 一般不为 0.

对综合得到的初始耦合矩阵进行多次旋转或优化,消去在微波结构中不易实现的单元,即得到可以实现的耦合矩阵结构形式,对于如图3所示的正规梯形耦合结构的滤波器,可以采用一个有规律的矩阵单元旋转序列,通过编程,一次即可获得最终的耦合矩阵.

通过耦合矩阵综合,可以获得对称、非对称以及带内复极点等各种特性带通滤波器的耦合矩阵,下面给出几个仿真试验结果.

6 阶 Chebyshev 特性滤波器的带内反射损耗为一 26 dB、传输零点均位于无穷远处,据此要求通过综合得到输入输出耦合系数 $R = [1.263 \ 1.263]$ 和耦合矩阵



●为谐振器;■为主耦合;---为交叉耦合

图3 梯形耦合结构

$M =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.962 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.962 & 0 & 0.656 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.656 & 0 & 0.618 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.618 & 0 & 0.656 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.656 & 0 & 0.962 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.962 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

所产生的幅频特性如图4a所示。

6阶椭圆函数特性滤波器的带内反射损耗为一22 dB、传输零点为 $[-1.9 \ 1.4 \ 1.8 \ 2.9]$,此时该滤波器在通带频率低端带外、高端带外分别具有1个和3个传输零点,据此要求综合得到滤波器的输入输出耦合系数 $R=[1.079 \ 1.079]$ 和耦合矩阵

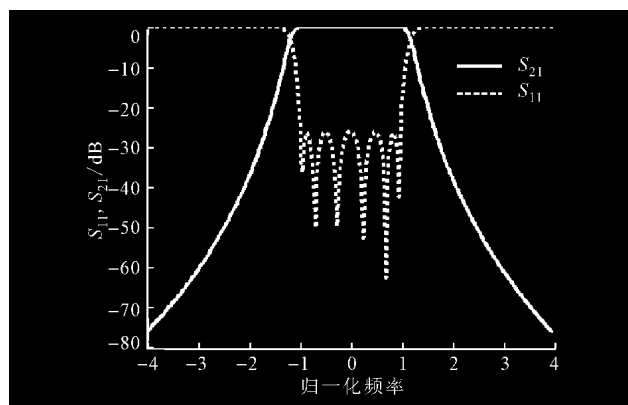
$M =$

$$\begin{pmatrix} 0.022 & 0.871 & 0 & 0 & 0 & 0.019 \\ 0.871 & 0.024 & 0.613 & 0 & -0.030 & 0.076 \\ 0 & 0.613 & 0.013 & 0.415 & -0.463 & 0 \\ 0 & 0 & 0.415 & -0.728 & -0.459 & 0 \\ 0 & -0.030 & -0.463 & -0.459 & 0.029 & 0.868 \\ 0.019 & 0.076 & 0 & 0 & 0.868 & 0.022 \end{pmatrix} \quad (6)$$

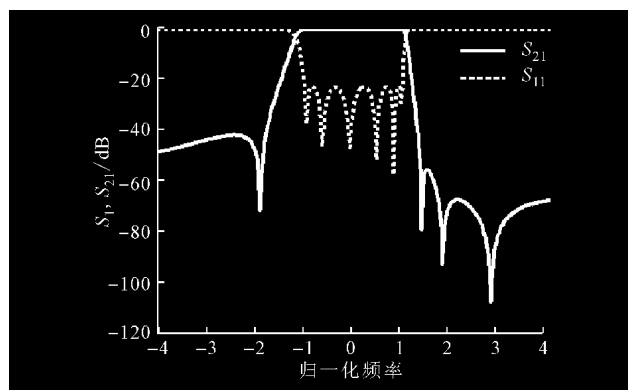
图4b为该滤波器的幅频特性,近年来具有这种非对称的类椭圆函数特性滤波器在移动通信基站、卫星地球站中应用日益广泛。

8阶椭圆函数特性滤波器的带内反射损耗为一22 dB、传输零点为 $[-0.154 \ 6 - j0.921 \ 8 \ -0.154 \ 6 + j0.921 \ 8 \ 1.199 \ 1 \ -1.199 \ 1 \ 1.653 \ 9 \ -1.653 \ 9]$,其中j为复数虚部符号,此时滤波器中的复传输零点具有对带内群时延特性和幅频特性均衡功能,实零点产生带外的衰减极点,据此要求综合得到的幅频特性见图4c。该类滤波器具有很好的带外抑制性能、带内幅频以及群时延性能,多用于卫星通信转发器中的输入多工器和其他信道滤

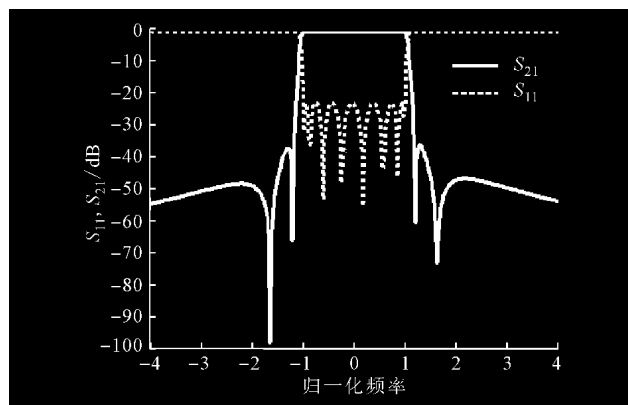
波器。



(a)6阶Chebyshev特性



(b)6阶非对称特性



(c)8阶对称特性

图4 综合的耦合矩阵产生的幅频特性

采用电磁场数值计算方法或电磁仿真软件对各种耦合结构进行仿真分析,获得与 M 、 R 中各元素相对应的结构参数^[14],完成滤波器的设计。

2 微带线带通滤波器实例

某任务需要研制一个微带式带通滤波器,主要技术指标如下:中心频率 f_0 为2 152 MHz,中心频率处的插入损耗不超过3 dB,在 $f_0 \pm 90$ MHz范围

内的插损变化不超过 3 dB,在 1 957 MHz 和 2 327 MHz 处的带外抑制不低于 55 dB.

根据上述技术指标,确定采用 6 阶类椭圆函数带通滤波器.由本文方法,综合得到该滤波器的耦合矩阵 $\mathbf{M}, \mathbf{R}$,其产生的幅频特性见图 5a.采用如图 1c 的结构形式实现该耦合矩阵:谐振器为方形,输入及输出端口与谐振器之间通过抽头线耦合来实现 R_1, R_n ,谐振器间的磁耦合和混合耦合实现 $\mathbf{M}$ 中的正耦合,电耦合实现 $\mathbf{M}$ 中的负耦合.微带基片材料是介电常数为 2.2 的聚四氟乙烯.图 5b 是该滤波器安装在屏蔽盒里测试的幅频特性曲线,由图 5b 可见,中心频率处的插入损耗为 2.74 dB,在 $f_0 \pm 90$ MHz 范围内的插损变化不超过 2.5 dB,在 1 957 MHz 处的带外抑制为 55.7 dB,在 2 327 MHz 处的带外抑制为 60.7 dB,均满足技术指标的要求.同时,对比图 5a、图 5b 可以发现,该滤波器的测试结果与设计预期值吻合较好.图 6 给出了本文设计的 6 阶微带线式类椭圆函数滤波器的实物照片.

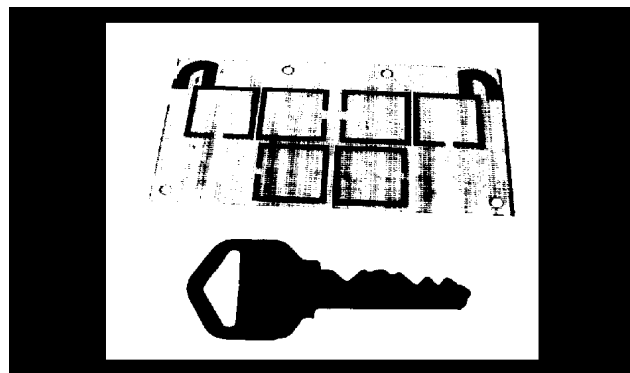


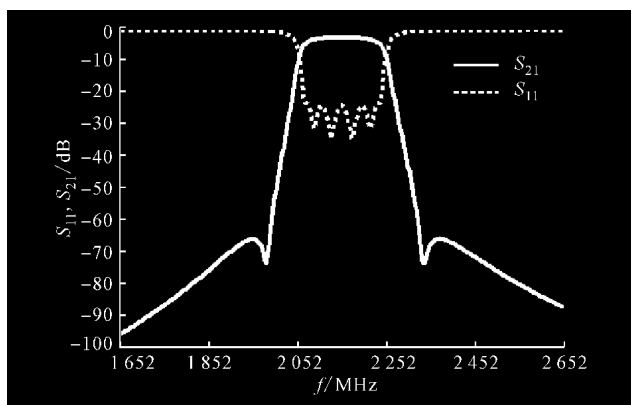
图6 本文微带 6 阶类椭圆函数滤波器实物

3 结束语

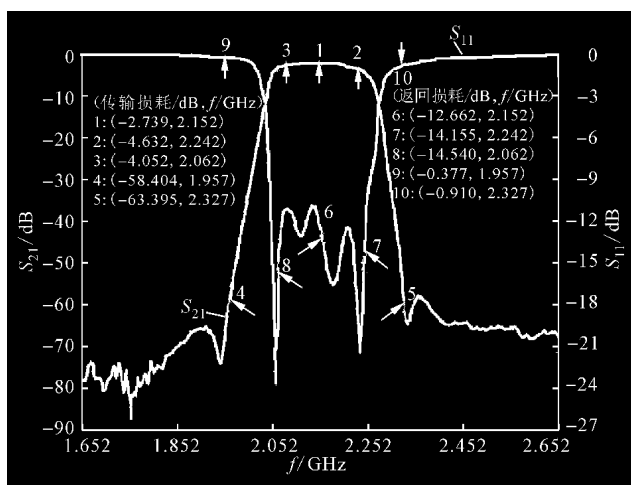
本文提出了一种微带线带通滤波器的分步式设计方法,进行了 6 阶 Chebyshev 特性、6 阶非对称及 8 阶对称的类椭圆函数特性滤波器耦合矩阵综合的仿真实验,设计并研制了一台 6 阶微带类椭圆函数滤波器,测试结果与设计值吻合较好,能完全满足技术指标的要求,仿真实验和测试结果表明,本文方法切实可行.

参考文献:

- [1] Chang K F, Tam K W. Miniaturized cross-coupled filter with second and third spurious responses suppression [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(2): 122-124.
- [2] Fork S W, Cheong P, Tam K W, et al. A novel microstrip square-loop dual-mode bandpass filter with simultaneous size reduction and spurious response suppression [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2006, 54(5): 2033-2041.
- [3] Park S J, Caekenberghe K V, Rebeiz G M. A miniaturize 2.1 GHz low loss microstrip filter with impedance electric and magnetic coupling [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(10): 496-498.
- [4] Tan B T, Yu J J, Chew S T, et al. A miniaturized dual-mode ring bandpass filter with a new perturbation [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2005, 53(1): 343-348.
- [5] Matthaei G L, Young L, Jones E M T. Microwave filters, impedance-matching networks and coupling structures [M]. New York: McGraw Hill, 1964.
- [6] Hong J S, Lancaster M J. Canonical microstrip filter using square open-loop resonators [J]. Electron Lett, 1995, 31(23): 2020-2022.
- [7] Hong J S, Lancaster M J. Microstrip bandpass filter



(a)模拟的传输和反射特性



(b)测试的传输和反射特性

图5 本文 6 阶微带线类椭圆函数带通滤波器的幅频特性

- using degenerate modes of a novel meander loop resonator [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Lett*, 1995,5(11):371-372.
- [8] Hong J S, Lancaster M J. Couplings of microstrip square open-loop resonators for crosscoupled planar microwave filters[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1996,44(12):2099-2108.
- [9] Hong J S, Lancaster M J. Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1997,45(12):2358-2365.
- [10] Hong J S, Lancaster M J. Cross-coupled microstrip hairpin-resonator filters[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1998,46(1):118-122.
- [11] Hong J S, Lancaster M J. Design of highly selective microstrip bandpass filters with a single pair of attenuation poles at finite frequencies [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2000,48(7):1098-1107.
- [12] Cameron R J. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1999,47(4):433-442.
- [13] 李胜先,吴须大,傅君眉. 一种微波滤波器机辅调试的新方法 [J]. *空间电子技术*,2004,1(2):4-11.
Li Shengxian, Wu Xuda, Fu Junmei. A new method for computer-aided tuning of microwave filters [J]. *Space Electronic Technology*, 2004,1(2):4-11.
- [14] Djaiz A, Denidni T A. A new compact microstrip two-layer bandpass filter using aperture-coupled sir-hairpin resonators with transmission zeros [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*,2006,54(5):1929-1936.
- (编辑 刘杨)