

Design of 2.3 GHz Generalized Chebyshev Filter

ZHENG Ze-guo¹, LIU Xin-liang^{1,2}

1.XiAn University of Science and Technology College Of communication, XiAn, CHN

2.XiAn Space Star Technology Enterprise (Group) Company, XiAn, CHN

E-mail: 1.adlofboy@126.com 2.bondxl@21cn.com

Abstract: With the rapid development of microwave communication technology, the high performance microwave filters have played important roles in the microwave and wireless communication system. A synthesis procedure, using optimization, for multiple coupled resonators filters having general topology and general response was described. The cost function for the optimization was based on the values of the characteristic function at its zeros and poles. The procedure deduced the coupling matrix of filters by using gradient-based Optimization technique, and also researched the relationship between filter parameters and physical structure. A high performance six cavities band-pass filter worked in 2.3GHz which was designed by this way had the response coincided with the theory response. The example is reported which validates the proposed synthesis procedure.

Key words: microwave filter; generalized Chebyshev; gradient optimization; coupling matrix; coaxial cavity

2.3GHz 广义 Chebyshev 滤波器的研制

郑泽国¹, 刘新良^{1,2}

1 西安科技大学通信与信息工程学院, 西安, 中国, 710054

2 西安航天恒星科技实业(集团)公司, 西安, 中国, 710061

E-mail: 1.adlofboy@126.com, 2.bondxl@21cn.com

【摘要】随着微波通信技术的迅速发展, 频谱资源日益紧张。高性能滤波器在微波与无线通信系统应用中显得日益重要。本文从具有高带外抑制的广义Chebyshev滤波器特征函数出发, 计算出其传输零点与传输极点并以此为依据构造目标函数。结合梯度优化算法直接对初始耦合矩阵进行优化, 推导出滤波器耦合矩阵。并在此基础上研究了滤波器数值参数与物理结构的关系。运用该方法设计了一个2.3GHz高性能六腔同轴基站带通滤波器并加工制作。实测结果与理论数据吻合, 证实该方法的可行性。

【关键词】微波滤波器; 广义Chebyshev; 梯度优化; 耦合矩阵; 同轴腔体

1. 引言

随着微波通信技术高速发展, 频谱资源日益紧张, 导致其划分越来越密集, 频带之间的干扰越来越强烈, 从而要求滤波器向紧结构, 低插损, 高带外抑制方向发展。微波滤波器作为微波通信中的核心器件已经成为现代微波系统中不可缺少的器件, 其性能优劣往往会直接影响整个通信系统的质量^[1]。为提高带外抑制, 设计高性能的滤波器必须基于新型的滤波函数, 在传统的 Chebyshev 滤波函数基础上衍生出来的广义切比雪夫滤波函数是一种可行的选择。作为一种新型高性能

资助信息: 西安科技大学硕士研究生培养经费; 西安航天科技实业(集团)公司项目科研经费

Xi'an University of Technology Funding for graduate training; Xi'an Aerospace Industry(Group) Company project for scientific research

能滤波器, 它一般利用非相邻谐振器之间的交叉耦合, 交叉耦合使输入和输出端口之间有多个信号通路, 依靠多路信号之间的相位差, 可以实现有限频率的传输零点, 提升滤波器带外抑制性能^[2]。

2. 广义 Chebyshev 滤波器理论

2.1 广义 Chebyshev 函数

由N个交叉耦合谐振器组成的无耗二端口滤波网络, 其传输函数和反射函数可表示成两个N阶多项式之比^[3]。式(1)中表示带通滤波器的反射系数和传输系数:

$$S_{11} = \frac{F_N(w)}{E_N(w)}, S_{21} = \frac{P_N(w)}{\varepsilon E_N(w)} \quad (1)$$

其中 w 是归一化实频率变量, \mathcal{E} 是带通滤波器的通带波纹系数, 幅度由下面的关系式决定

$$\mathcal{E} = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{RL}{10}} - 1}} \cdot \left. \frac{P_N(w)}{F_N(w)} \right|_{w=1} \quad (2)$$

RL为通带内回波损耗, 同时引入滤波函数可得:

$$s_{21}^2(w) = \frac{1}{1 + \mathcal{E}^2 C_N^2(w)} = \frac{1}{(1 + j\mathcal{E}C_N(w))(1 - j\mathcal{E}C_N(w))} \quad (3)$$

$C_N(w) = \frac{F_N(w)}{P_N(w)}$ 为N阶广义Chebyshev特征函数, 表达式如下:

$$C_N(w) = \cosh \left[\sum_{n=1}^N \cosh^{-1}(x_n) \right] \quad (4)$$

$$x_n = \frac{w(w_n - 1/w)}{w_n - 1}$$

最后得 $P_N(w)$ 多项式系数递推公式表示如下:

$$P_{N+1}(w) = -P_{N-1}(w)(1 - w/w_n)^2 \frac{(1 - 1/w_{n+1}^2)^{1/2}}{(1 - 1/w_n^2)^{1/2}} + P_N(w) \left\{ w - 1/w_{n+1} + (w - 1/w_n) \frac{(1 - 1/w_{n+1}^2)^{1/2}}{(1 - 1/w_n^2)^{1/2}} \right\} \quad (5)$$

2.2 耦合矩阵的提取及变换

广义 Chebyshev 滤波器可以用等效电路的方法进行分析, 其基本的设计思路是由滤波器的设计指标确定谐振器之间的耦合系数, 再由耦合系数确定滤波器的物理参数^[4]。A. E. Atia 在 1972 年就首先提出了交叉耦合滤波器的电路模型, 并根据模型建立了电路矩阵方程, 其具体的建立过程如下^[5]:

首先, 如下图所示, 根据Kirchhoff沿环路电压定理, 电路网络的环路方程为:

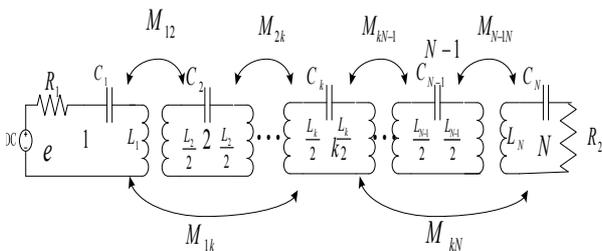


Figure 1. equative circuit of N-order generalized Chebyshev filter
图 1. N 阶广义 Chebyshev 滤波器等效电路

$$[jM + sL + R] \cdot [i_1 \ i_2 \ i_3 \ \dots \ i_N]^T = e_1 [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (6)$$

其中 $s = j(w - \frac{1}{w})$ 是归一化的频率转换变量,

R 是除 $R_{11} = R_1$ (源阻抗)与 $R_{22} = R_2$ (负载阻抗), 其他元素都为零的二维N阶矩阵。 M 为实对称耦合矩阵, 对角线上元素 M_{ii} 代表每一个谐振腔的自耦合, 表示每一个谐振腔的谐振频率 f_i 与滤波器的中心频率 f_0 之间的偏差, 非对角元素 M_{ij} 表示第i个谐振腔与第j个谐振腔之间的耦合系数($i \neq j$)。L是单位矩阵, 电流向量

$I = [i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_{N+1}, i_N]^T$, $[Z] = [jM + sL + R]$ 为等效阻抗矩阵。可以看出电流向量 $[I]$ 可以表示为:

$$[I] = -j[Z^{-1}] \cdot [e] \quad (7)$$

于是整个交叉耦合电路的 S 参数就可以表示为:

$$S_{21} = 2\sqrt{R_1 R_2} i_N = -2j\sqrt{R_1 R_2} [Z^{-1}]_{N1} \quad (8)$$

$$S_{11} = 1 - 2R_1 i_1 = 1 + 2jR_1 [Z^{-1}]_{11} \quad (9)$$

上述二式通过 S 参数建立了广义切比雪夫函数和交叉耦合等效电路之间的联系, 从而可以求出耦合矩阵 M。

由于此耦合矩阵在物理结构上不可实现, 故要对耦合矩阵进行变换, 最后变成物理可实现的耦合结构。本文采用 Amari 的基于梯度优化算法对耦合矩阵进行优化^[6], 优化法利用现成的数学优化算法, 具有理论简单, 任意指定拓扑结构等优点。优化的过程可以描述成一个求目标函数最小化的过程, 首先定义一个指定拓扑结构, 设置相邻耦合系数与交叉耦合系数的初值分别为 0.5 与 0, 沿目标函数的梯度负方向进行搜索。目标函数表示迭代过程中的响应与理想响应之间的误差值, 当其值趋近于 0 时候, 迭代后的耦合矩阵为所需要的耦合矩阵。构造优化算法的目标函数:

$$K = \sum_{i=1}^p |S_{21}(w'_{pi})|^2 + \sum_{i=1}^N |S_{11}(w'_{zi})|^2 + (|S_{11}(w'=-1)| - \frac{\mathcal{E}}{\sqrt{1+\mathcal{E}^2}})^2 + (|S_{11}(w'=1)| - \frac{\mathcal{E}}{\sqrt{1+\mathcal{E}^2}})^2 \quad (10)$$

式中, \mathcal{E} 为波纹系数, w'_{zi} 和 w'_{pi} 是函数 $C_N(w)$ 的零点和极点。得出归一化耦合矩阵 M 后从而可以确定反归一化耦合矩阵 m。

$$m = FBW \times M \quad (11)$$

其中 $FBW = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$ ，为滤波器归一化带宽， f_0 为中心频率， f_1, f_2 分别滤波器上，下边带频率。

3. 广义 Chebyshev 滤波器设计与仿真

基于上述理论，设计一个同轴腔体基站滤波器，中心频率为 2330MHz,带宽为 60MHz,回波损耗小于 20dB,插入损耗小于 1dB,峰值功率容量为 500W,带外衰减 2170-2235MHz 处小于 45dB, 2420-2485MHz 处小于 35dB,上边带抑制要求高于下边带。故在 3 腔与 5 腔引入容性交叉耦合，可在上边带处产生传输零点，以满足阻带抑制要求。运用上述理论通过 Matlab 编程得出滤波器频率归一化 S 参数如下图所示：

利用梯度优化算法得到相应拓扑结构的实对称耦合矩阵 M ，利用公式 (11) 得到反归一化耦合矩阵 m ,进行滤波器结构建模。

$$m = \begin{bmatrix} 0 & 0.02261 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.02261 & 0 & 0.01605 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01605 & 0 & 0.01389 & -0.0039 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01389 & 0 & 0.01471 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0039 & 0.01471 & 0 & 0.02261 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.02261 & 0 \end{bmatrix}$$

根据同轴腔体结构特性^[7]，在此选取内导体外半径 $a=3\text{mm}$ ，外导体内半径 $b=10\text{mm}$ ，高度 $H=23\text{mm}$ ，内导体长度 l 、调谐螺钉最大调谐距离 Ft 的设计既要考虑能够满足所需的调谐范围,同时还要考虑到内导体缩短会降低无载 Q 值的因素,一般选择内导体长度略小于 $1/4$ 波长,在此选取 $l=19\text{mm}$, $Ft=9\text{mm}$ 。谐振腔的调谐范围将通过 HFSS 软件进行仿真。

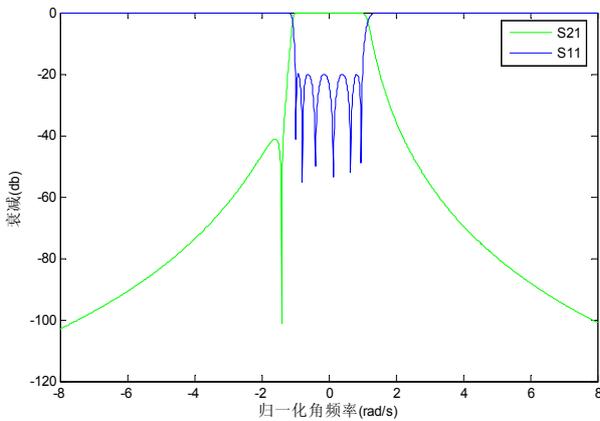


Figure 2. normalized S parameter curve of filter
图2. 滤波器频率归一化S参数曲线

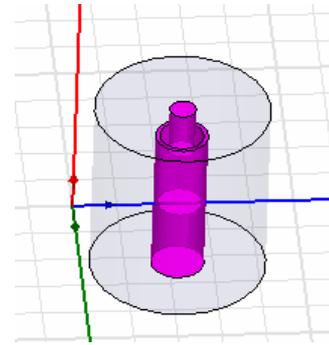


Figure 3. single cavity resonant structure simulation
图3. 单腔谐振结构仿真

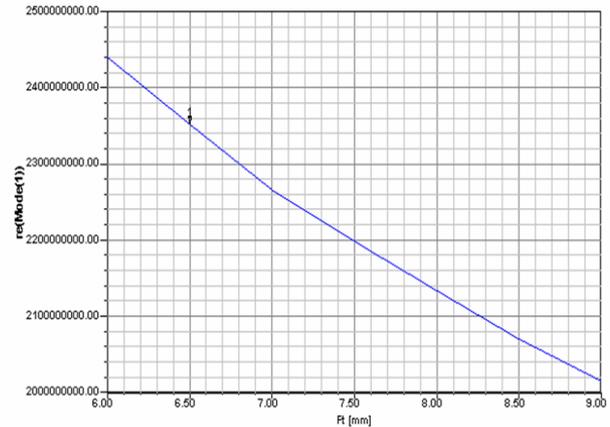


Figure 4. single cavity resonant frequency simulation
图4. 单腔谐振频率仿真

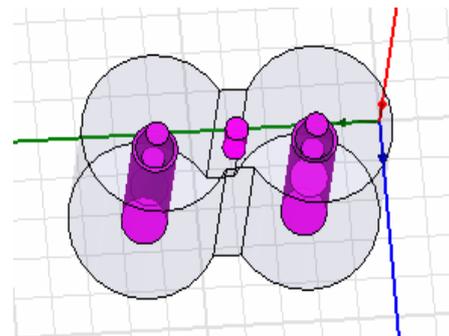


Figure 5. double cavities coupled structure simulation
图5. 双腔耦合结构仿真

由上图可知：当调谐螺钉半径 $c=1.5\text{mm}$,调谐螺钉进入谐振杆长度 Ft 越长时，谐振频率越低，当 $Ft=6.6\text{mm}$ 时，谐振频率为 2330MHz。输入信号通过输入抽头耦合到谐振腔中产生谐振,能量在谐振腔之间由耦合窗进行逐级耦合,再经过输出端的抽头耦合输出。各腔均工作在同一谐振频率附近,只有该谐振频率附近的电磁波有效传输,形成一带通滤波器。

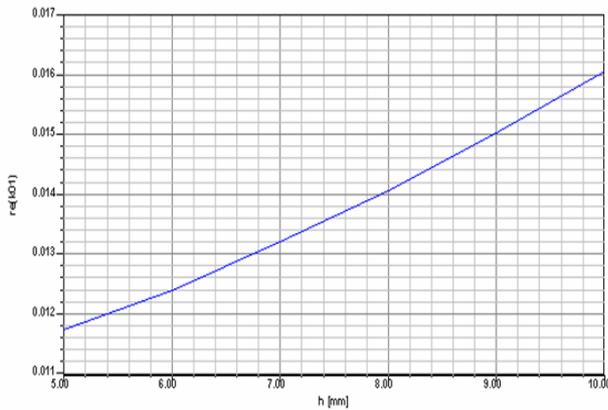


Figure 6. coupling coefficient of adjacent cavity
图 6. 相邻腔体之间耦合系数仿真

由图可知：当开窗宽度为8 mm，高度为23 mm，耦合螺钉半径 $d = 3$ mm时，耦合螺钉 h 越长，耦合系数越大。当计算出各腔耦合系数后，可以将窗口适当开的小一些，然后通过调节耦合螺钉得到准确的耦合系数。

非相邻谐振腔间常使用探针或耦合环实现非相邻腔的容性或感性耦合，交叉耦合使输入和输出端口之间有多个信号通路，依靠多路信号之间的相位差，可以实现有限频率的传输零点。

根据滤波器指标及耦合矩阵，以及同轴腔体和耦合结构的设计，确定滤波器阶数及拓扑结构。考虑基站滤波器的防水性能，输入端口采用可防水QMA连接器，固定在腔体盖板上，输出端口采用标准N型连接器，固定在腔体侧面。建立同轴腔体滤波器模型如下图所示：

模型在设计时考虑到了腔体的调谐螺钉及腔间的耦合螺钉的可调，由于变量较多，通过仿真得到理想的仿真曲线比较费时，但是以上模型的中心频率、带

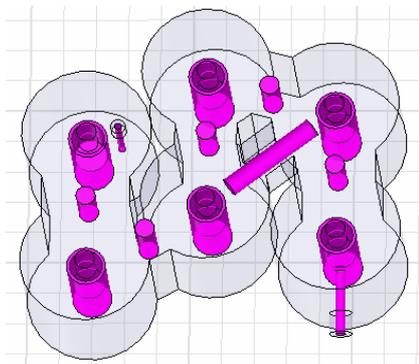


Figure 7. filter whole model
图 7. 滤波器整体模型



Figure 8. Filter real object (same double filters)
图 8. 滤波器加工实物 (双滤波器)

宽及传输零点都已基本达到设计要求，带内波纹回波损耗可以在实物调试时通过调谐螺钉调试出来。为了缩短研制周期，将通过耦合系数建立的滤波器模型直接加工调试，滤波器实物如上图所示。

4. 滤波器的调试与测试

根据图七中模型，加工出图八中的六阶广义Chebyshev同轴腔体双滤波器(左右为相同的滤波器)，腔体及谐振杆采用金属铝制作，外表面均镀银，调谐螺钉及耦合螺钉采用金属铜制作。盖上盖板，加上调谐螺钉，耦合螺钉以及防水QMA连接器，在矢网上进行调试。首先调节调谐螺钉，将频率调谐在滤波器中心频率附近，然后调节耦合螺钉，使曲线平滑，反复进行调试，最终结果如下：

从测试图可以知道,通带内插入损耗均小于1 dB，回波损耗在通带内均小于20 dB，约为26 dB，具有极小的回波损耗。带外衰减2170-2235 MHz处小于51 dB，优于指标45 dB。2420-2485 MHz处小于40 dB，



Figure 9. test S parameter curve of filter
图 9. 滤波器 S 参数测试图

优于指标35 dB。对滤波器进行功率测试时,加500 W功率信号时发现滤波器未被击穿,具有优良的功率容量。实测出的滤波器各项指标均满足要求。

5. 结束语

文中基于广义Chebyshev函数的同轴腔体滤波器的设计和制作,研究了与之相关的理论和技术。在此基础上实现了2.3 GHz高性能同轴腔体基站滤波器,采用防水结构设计,输入输出端口直流接地,具有高功率容量,低插损,可靠的避雷防水性能。实测结果与设计指标吻合较好,验证了该设计方法的可行性,在理论研究和工程应用上都具有重要意义。

致谢

本文是在高级工程师刘新良老师的悉心指导下完成的,在此对刘新良老师表示衷心的感谢。

References (参考文献)

- [1] Jia-Sheng Hong, M.J.Lancaster. Microstrip Filters for RF/Microwave applications[M].NEW York, A Wiley-Interscience Publication,2001:1-5.
- [2] XI Mei. Analysis and design of generalized Chebyshev filter.[D].XIDIAN university,2006:16-18.
郗玫.广义 Chebyshev 滤波器的分析和设计[D].西安电子科技大学, 2006: 16-18.
- [3] R. J. Cameron. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering Function[J].IEEE Trans.on MTT. 1999. MTT-47(4):433-442.
- [4] GAN Ben-ba, WU Wan-chun. Structure and design of microwave filters [M].BEIJING scientific publishing company,1973
甘本祓, 吴万春.现代微波滤波器的结构与[M].北京 科学出版社, 1973.
- [5] A E Atia , A E Williams . Narrow-bandpass waveguide filters [J].IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1972, 20 (3):258-265.
- [6] Amari S. Synthesis of Cross—coupled Resonator Filters using Analytical Gradient—based Optimization Technique[J].IEEE Trans on MTT, 2000, 48(9): 1559-1564.
- [7] ZHAO Ke-yu, XU Fu-yong. Microwave theory and technology [M]. Beijing:Higher education press, 2006.02:200-203.
赵克玉, 许福永, 微波原理与技术[M].北京,高等教育出版社, 2006.02: 200-300.