

自均衡线性相位高温超导滤波器的设计

季来运, 马杰, 孙钧, 王朗, 李演奇, 许开维, 肖国栋, 任建成

(海泰超导通讯科技(天津)有限公司, 天津 300384)

摘要:针对第三代移动通信 CDMA 2000 标准用超导滤波器的技术要求,设计了一种自均衡线性相位高温超导滤波器,给出了 14 阶三个交叉耦合的 CQ 结构滤波器理论计算结果、等效电路、耦合矩阵,设计的滤波器中心频率为 830MHz,65% 带宽内的群时延波动优于 $\pm 10\text{ns}$,滤波器模拟仿真结果与理论计算很好得吻合。

关键词:高温超导滤波器; 群时延; 自均衡; CDMA 2000 通信系统

Design of linear phase HTS filter with self - equalizer cross - coupling

Ji Laiyun, Ma Jie, Sun Jun, Wang Lang, Li Yanqi, Xu Kaiwei, Xiao Guodong, Ren Jiancheng

(Hi - Tech Superconducting Communication Technologies(Tianjin) Co. ,Ltd. ,Tianjin 300384 , China)

Abstract: This paper designed a 14 - pole 3 - cross coupling linear phase superconducting filter for CDMA2000 mobile communication system. The paper provided the calculated results, equivalent circuit, coupling matrix and simulated performance of CQ filter. The center frequency is 830MHz; the ripple of group delay is less than $\pm 10\text{ns}$ in 65% of bandwidth.

Keywords: HTS filter, Group delay, Self - equalization, CDMA 2000 System

1 前言

近年来,随着高温超导材料技术的发展,为设计高性能的滤波器提供了一个可行有效的方向。高温超导滤波器与常规滤波器相比,具有非常显著的性能优势:极低的插入损耗、优异的频率选择性可以提高系统的接收灵敏度、增加系统的覆盖面积、提高通话质量、降低终端的发射功率,可以提高系统的频率利用率;增加系统的容量、提高系统的抗干扰能力、减少掉话,全面提高网络的服务质量。因此,高温超导滤波器在无线通信系统、卫星通信系统、高灵敏度接收系统中具有广阔的应用前景。美国 STI 公司已经在北美实现了超导滤波器在移动通信基站中的规模应用,目前大约有 6 000 台超导滤波器在实际的应用之中。清华大学在北京联通、天津海泰超导公司在天津联通也分别进行了高温超导滤波器在 CDMA 基站的实际并网运行和测试^[1-3]。

由于前期高温超导滤波器的设计主要用于语音通信的 2G、2.5G 移动通信系统,不太关注滤波

器的线性相位指标。随着第三代移动通信的快速发展,使用的频带宽度变宽,对前端滤波器的线性相位指标要求较高。若采用常规的滤波器设计结构(如常用的切比雪夫滤波器),随着滤波器阶数的增加,滤波器边沿陡峭度提升,但滤波器中心频率处的群时延与通带内上下边带附近的群时延会有很大的偏差,且滤波器越陡峭,群时延失真越大。群时延的失真会使通过滤波器的高频信号产生很大的相位失真,应用于数字移动通信系统的接收机射频前端时就会使解调质量下降,误码率增加。

2 线性相位滤波器的设计理论

目前解决群时延失真问题常用的技术方案有两种:其一是采用外部均衡的方法,通过插入一个与滤波器相位特性相反的相移均衡器对滤波器的相位进行调制。插入的外部均衡器的群时延起伏方向与滤波器通带内的群时延起伏相反,通过两者的迭加,从而实现整个系统的群时延平坦^[4];其二是自均衡方法,通过在谐振器间引入交叉耦

收稿日期:2008-10-17

项目基金:国家高技术研究发展计划“863 计划”(2006AA03Z235)资助。

作者简介:季来运(1973-),男,工程硕士,高级工程师,主要从事高温超导微波器件开发与应用研究工作。

合,在复平面的实轴得到传输零点,平坦的群时延将在滤波器内自动产生。

由于采用外部均衡的方法,需要引入环行器或3dB定向耦合器和反射谐振器阵,增加了超导滤波器的电路面积,非常不利于高温超导滤波器的小型化集成工作。因此,本文将采用第二种方案即自均衡线性相位滤波器进行设计。

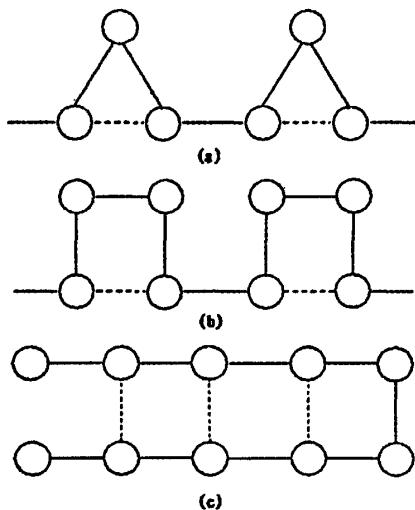


图 1 几种常用交叉耦合滤波器结构

(a) CT 结构; (b) CQ 结构; (c) Canonical 结构

Fig. 1 Several kinds of cross-coupling structures

(a) Trisection structure; (b) Quadruplet structure; (c) Canonical structure

目前用来引入交叉耦合的滤波器常用结构有

CT (Cascaded Trisection) 结构、CQ (Cascaded Quadruplet) 结构、Canonical 结构等(如图 1 所示)。对于 CT 结构,三个谐振器组成一最小单元,一般用来改善滤波器的幅频特性;对于 CQ 结构,四个谐振器组成一最小单元,可以通过改变交叉耦合的极性来调节传输零点在复平面的位置,若交叉耦合与直接耦合极性相反,则在通带两侧的频域产生传输零点,改善滤波器幅频特性,若交叉耦合与直接耦合极性相同,则可改善滤波器群时延特性。Canonical 结构,通过改变交叉耦合的极性,可以得到既能在频域产生传输零点、又能改善群时延特性的结果,但其交叉耦合不是独立的而是相互影响的,调节难度较大。^[5]

我们设计的用于 CDMA 2000 系统的高温超导线性相位滤波器的中心频率为 830MHz,考虑到系统的实际应用和滤波器的实际制作误差,我们设计时将滤波器的通带宽度进行适当放宽。采用 CQ 滤波器结构,滤波器总阶数为 14 阶,四个谐振器为一组,每组引入一个交叉耦合。为方便设计,连接输入输出端口的第一个和最后一个谐振器不参与交叉耦合的引入,引入的三个交叉耦合中,其中一个为提升边缘陡度的传输零点,耦合极性与相邻谐振器间的直接耦合相反;两个交叉耦合为改善相位特性的零点,耦合极性与相邻谐振器间的直接耦合相同。滤波器的拓扑结构图如图 2 所示,图中数字代表谐振器次序,实线代表相邻谐振器间直接耦合关系,虚线为非相邻谐振器间引入的交叉耦合关系。

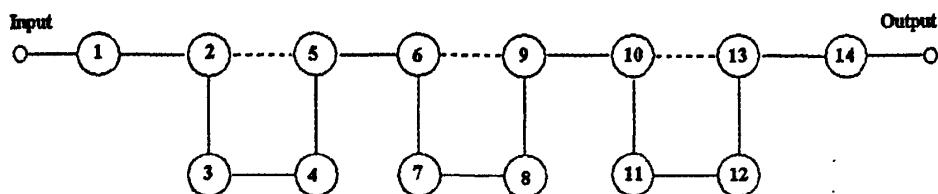


图 2 14 阶 3 交叉耦合线性相位滤波器拓扑结构

Fig. 2 The topology structure of 14-pole 3-cross coupling CQ filter

在滤波器的拓扑结构中,第 2 阶与第 5 阶谐振器,第 10 阶与第 13 阶谐振器间引入的交叉耦合对滤波器群时延特性进行自均衡,第 6 阶与第 9 阶谐振器间的交叉耦合在频域产生传输零点,提升滤波器的边缘陡度。CQ 结构滤波器的等效电路图如图 3 所示,图中显示的是一个最小单元

(谐振器 2~5) 的直接耦合和交叉耦合的等效电路路。

通过优化设计等效电路中的各元件值,可以得到如图 4 所示的滤波器理论计算结果:其中(a)为滤波器传输和反射理论曲线;(b)为群时延特性曲线。

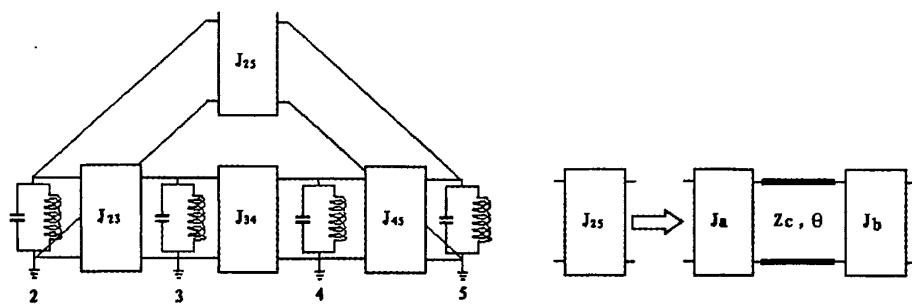


图3 CQ 滤波器中一组交叉耦合单元的等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of a quadruplet cross - coupling of the CQ filter

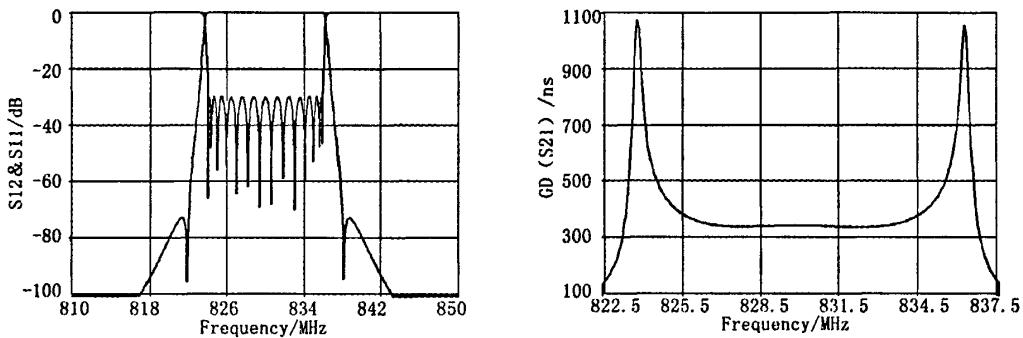


图4 14阶CQ滤波器理论曲线

(a) 传输和反射特性; (b) 群时延特性

Fig. 4 Calculated performance of 14 - pole CQ filter

(a) S12 & S11 (b) Group delay

由优化后的各元件值,计算得到的滤波器耦合矩阵。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & M_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{1,2} & 0 & M_{2,3} & 0 & M_{2,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{2,3} & 0 & M_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{3,4} & 0 & M_{4,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{2,5} & 0 & M_{4,5} & 0 & M_{5,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{5,6} & 0 & M_{6,7} & 0 & M_{6,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{6,7} & 0 & M_{7,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{7,8} & 0 & M_{8,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{8,9} & 0 & M_{9,10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{9,10} & 0 & M_{10,11} & 0 & M_{10,13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{10,11} & 0 & M_{11,12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{11,12} & 0 & M_{12,13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{12,13} & 0 & M_{13,14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{13,14} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中: $M_{1,2} = M_{13,14} = 0.0147977$, $M_{2,3} = M_{12,13} = 0.0091087$, $M_{3,4} = M_{11,12} = 0.0062857$, $M_{4,5} = M_{10,11} = 0.0079557$, $M_{5,6} = M_{9,10} = 0.0079650$, $M_{6,7} = M_{8,9} = 0.0076092$, $M_{7,8} = 0.0095768$, $M_{2,5} = M_{10,13} = 0.0024096$, $M_{6,9} = -0.0018072$ 。

3 高温超导线性相位滤波器的电路设计

我们依据以上的理论数据进行高温超导滤波器的电路设计,微带电路基片选用 0.5mm 厚度的 2 英寸氧化镁(MgO)基片,介电常数取为 9.75,滤波器电路的电磁场模拟仿真采用 Sonnet 10.52 软件来完成。

在进行超导滤波器电路的物理结构设计时,应充分考虑滤波器整体结构的布局。采用结构紧凑的谐振器结构,不但可以整体上减小滤波器的尺寸,同时方便交叉耦合线的引入。^[6]

本工作中的谐振器耦合关系有两种;一是相邻谐振器间的直接耦合关系;二是通过交叉耦合线引入的非相邻谐振器间的交叉耦合。

根据耦合谐振电路理论,我们用 Sonnet 软件进行模拟仿真获得原始的滤波器电路设计数据,由滤波器耦合矩阵指导滤波器实际电路的设计,主要依据以下几个计算公式:

滤波器半波长谐振器长度的确定:

$$L = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

其中 f_0 为滤波器的中心频率, $c = 3 \times 10^8$ m/ s 为自由空间电磁波传播速度, ϵ_{eff} 为滤波器超导微带电路采用基板的有效介电常数。

滤波器输入输出端外部 Q_o 的确定:

$$Q_o = f_0 / \Delta f_{-3dB} \quad (2)$$

其中 f_0 为频域响应曲线的中心频率, Δf_{-3dB} 为相较于 f_0 衰减 -3dB 处的频带宽度。采用 Sonnet 软件模拟仿真,通过调整输入输出馈线的位置得到理论计算出的 Q_o 值。

谐振器耦合系数 K 的确定,以电磁波信号激励两个发生耦合作用的谐振器,则其耦合系数为

$$K = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (3)$$

其中 f_1, f_2 为两个谐振器发生耦合关系时分离出的两个谐振峰频率值。对于三个交叉耦合,通过引入交叉耦合线来实现,同样采用 Sonnet 软件仿真,计算方法与相邻谐振器的耦合相同。

因为具体的设计过程已经有非常成熟的计算公式和设计步骤可依照进行,本文不再赘述^[7,8]。

由以上的设计过程,可以初步得到超导滤波

器的实际电路,因为不可避免的寄生效应的存在,滤波器的仿真结果会与理论计算值有很大的不同,还需要对滤波器电路进行细微的调整和优化,使设计曲线与理论曲线尽量吻合,我们最后得到 14 阶 CQ 滤波器的设计模拟仿真结果(如图 5 所示),具体的指标比较见表 1。

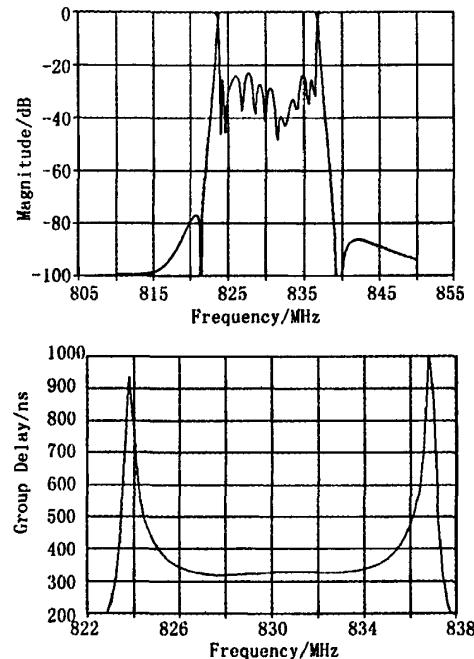


图 5 14 阶 CQ 滤波器模拟仿真结果 (a) 传输和反射特性 (b) 群时延特性

Fig. 5 Simulated performance of 14-pole CQ filter (a) S12 & S11 (b) Group delay

表 1 14 阶 3 交叉耦合滤波器设计与理论主要技术指标比较

Tab. 1 The comparison of design parameters with the theory ones of 14 pole and 3 cross coupling filter

项目	理论计算	模拟仿真
中心频率	830MHz	830MHz
回波损耗	-28dB	-23dB
带边陡度(低频端)	80dB/2.2MHz	80dB/2.4MHz
带边陡度(高频端)	80dB/2.2MHz	80dB/2.3MHz
带外抑制	> 80dB	> 80dB
群时延波动 < ±10ns 带宽	$f_0 \pm 3.95\text{MHz}$	$f_0 \pm 3.9\text{MHz}$
群时延波动 < ±20ns 带宽	$f_0 \pm 4.55\text{MHz}$	$f_0 \pm 4.5\text{MHz}$
群时延波动 < ±40ns 带宽	$f_0 \pm 5.15\text{MHz}$	$f_0 \pm 5.1\text{MHz}$

(下转第 22 页)

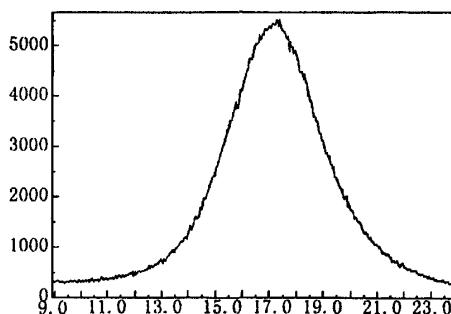


图 6 CeO_2 帽子层 ω 扫描图
Fig. 6 X-ray ω -scan of CeO_2 Cap Layer

4 结论

通过 PLD 方法能够很好地制备出 CeO_2 帽子层, 并且很好地继承了衬底的组织, 能够得到均匀的、致密的、无裂纹生成的薄膜。从试验过程可以看出, 激光的频率对 CeO_2 的影响很大, 而 CeO_2 薄膜生长的温度范围虽然较为宽泛, 但也要在合适的温度范围内, 才能生长出良好的 CeO_2 膜层。在 CeO_2 上制备 YBCO 层, 其临界电流密度可以达到 1.5 mA/cm^2 (77K)。可见, PLD 作为一种技术途径, 在隔离层制备方面有很大的用处。

(上接第 4 页)

4 结论

本文讨论了自均衡线性相位高温超导滤波器的设计理论, 设计了适用于 CDMA 2000 系统的包括三个交叉耦合的 14 阶 CQ 结构的高温超导滤波器, 给出了滤波器的耦合矩阵和等效电路以及滤波器电路设计的方法步骤, 实际设计的滤波器模拟仿真结果和理论计算值基本吻合, 65% 带宽内的群时延波动小于 $\pm 10\text{ns}$, 得到了较理想的设计结果。

参考文献

- [1] 季来运, 等. CDMA 移动通信系统用高温超导滤波器的研制 [J]. 低温物理学报, 2005, 27(4), 365–370.
- [2] 曹必松. 高温超导滤波器从实验室到规模应用 [C].

参考文献

- [1] 古宏伟, 杨坚, 刘慧舟, 等. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 涂层导体的研究进展 [J]. 中国稀土学报, 2006, 24(3): 257.
- [2] Sutoh Y, Nakaoka K, Matsuda J, et al. Effective thickness of CeO_2 buffer layer for YBCO coated conductor by advanced TFA-MOD process [J]. Physica C: Superconductivity, 2007, 463–465: 571–573.
- [3] Dijkkamp D, Venkatesan T, Wu X D. Preparation of $\text{Y}-\text{Ba}-\text{Cu}$ oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Te bulk material [J]. Appl. Phys. Lett., 1987, (51): 691.
- [4] Vispute R D, Talyansky V, Sharma R P, et al. Advances in pulsed laser deposition of nitrides and their integration with oxides [J]. Applied Surface Science, 1998, 127–129: 431–439.
- [5] Singh Rajiv K, Kumar D. Pulsed laser deposition and characterization of high- T_c $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting thin films [J]. Materials Science and Engineering, 1998, R22: 113–185.
- [6] 唐亚陆, 杜泽民. 脉冲激光沉积(PLD)原理及其应用 [J]. 桂林电子工业学院学报, 2006, 26(1): 24.
- [7] 张华, 杨坚, 古宏伟, 等. YBCO 涂层导体 CeO_2 、 Y_2O_3 缓冲层的生长研究 [J]. 中国稀土学报, 2006, 24(5): 636.

昆明: 中国电子学会超导电子学分会 2007 年度学术会议, 2007.

- [3] 美国 STI 公司网站资料: <http://www.suptech.com>.
- [4] 王建伟, 等. 一种结构新型的高温超导群时延均衡器 [J]. 低温物理学报, 2005 年增刊 1 期.
- [5] Genichi Tsuzuki, Shen Ye, Stuart Berkowitz. Ultral-selective 22-pole 10-transmission zero superconducting bandpass filter surpasses 50-pole Chebyshev filter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(12): 2924–2929.
- [6] 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.
- [7] 甘本祓, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1973.
- [8] Hong Jia-Sheng, Lancaster M J. Microstrip filter for RF/microwave application [M]. A Wiley-Interscience Publication, 2001.

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、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/>