

文章编号 :1000-2278(2009)02-0264-05

## 通信用电调微波带通滤波器的研究现状

曹良足 王帅 林程

(景德镇陶瓷学院机电学院,景德镇 333001)

### 摘要

电调微波带通滤波器广泛用于微波多信道接收机和电子对抗系统。介绍了电调微波带通滤波器的研究进展。针对电调滤波器设计、结构和性能,综述了调谐原理、电调元件、微波实现、通带特性等,并对电调微波带通滤波器的未来发展进行了展望。

关键词 微波滤波器,电调谐,变容二极管,压电换能器,铁电薄膜

中图分类号:TQ174.5 文献标识码:A

## 1 前言

随着通信的快速发展,微波滤波器的应用日益广泛。频率可调带通滤波器是一种新型滤波器,主要用于微波接收机和电子对抗系统,是电子支援措施接收系统的关键部件之一,它的现状和发展趋势引起国内外研究者的极大重视,研究成果主要集中在滤波器的调谐方式方面。实现频率可调的方法很多,大致有4种:机械调谐、磁调谐、电谐振和光调谐。本文将介绍电调谐带通滤波器的结构、调谐原理和性能等。

## 2 电调谐原理和电调元件

电调谐滤波器是指在直流电压作用下,中心频率随电压发生相应改变的滤波器。最常见的电调元件是变容二极管,除此之外,还有压电换能器、铁电薄膜等。

### 2.1 变容二极管电调谐滤波器

变容二极管电调谐滤波器的结构比较简单,变容管直接加载在谐振单元的一端,一般采用梳状线结构,如图1所示<sup>[1]</sup>。

通过改变反向偏压  $V_{bias}$  来改变变容管结电容  $C_s$  的大小,从而改变滤波器的中心频率。调谐频率和结

电容的关系式如下:

$$\frac{1}{Y_0} 2\pi f \cdot \tan(\theta) \cdot C_s(f) = 1 \quad (1)$$

式中,  $Y_0$  为谐振器的特性阻抗,  $\theta$  是在调谐频率  $f$  时的电长度,  $C_s(f)$  是在调谐频率  $f$  时的电容值。

报道变容管调谐滤波器的文献很多,冯军<sup>[2]</sup>、史云涛等<sup>[3]</sup>、袁建荣等<sup>[4]</sup>和本人<sup>[5]</sup>都详细介绍了L波段梳状微带线电调带通滤波器的设计和制作过程; Andrew R. Brown, et al<sup>[6]</sup>设计和制作了调谐范围 700~1330MHz 的悬置基片叉指微带线滤波器,图2为其实物图和测试结果。

变容管电调滤波器具有调谐速度快,调谐频率范围宽,外壳加工简单,接地容易而且不需要外壳与其

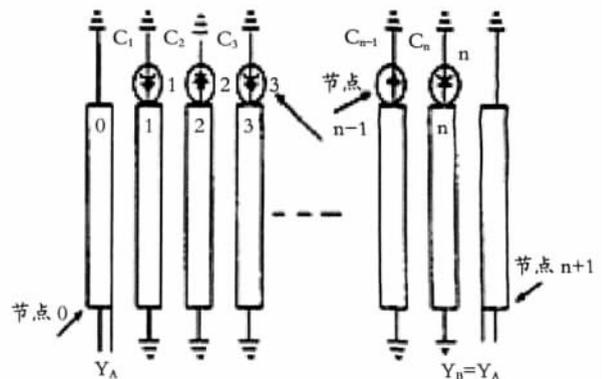


图1 梳状线滤波器的电路结构

Fig.1 The structure of the combline filter

收稿日期 2009-03-24

通讯联系人:曹良足,男, E-mail: clz4233@yahoo.com.cn.

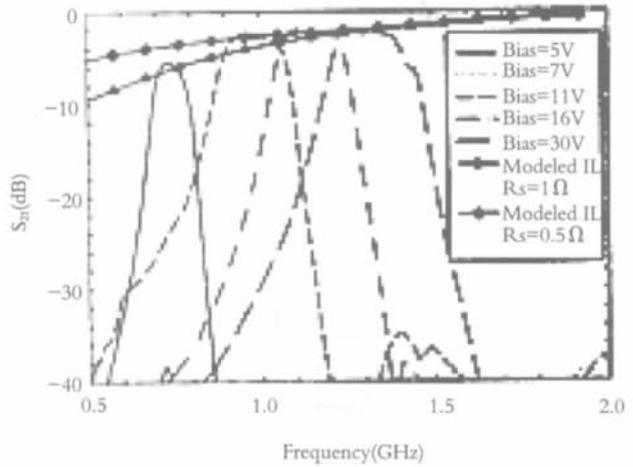
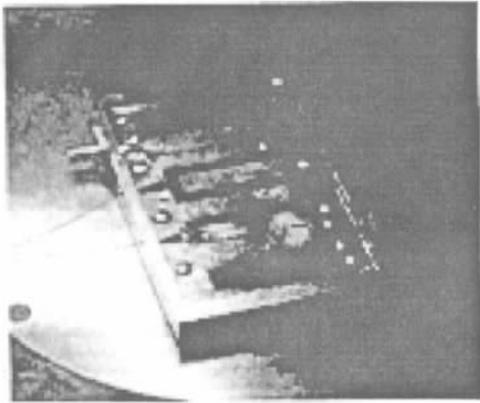


图 2 叉指微带线电调滤波器的实物图和频响曲线

Fig.2 Photograph and measured S-parameters of interdigital tuned filter

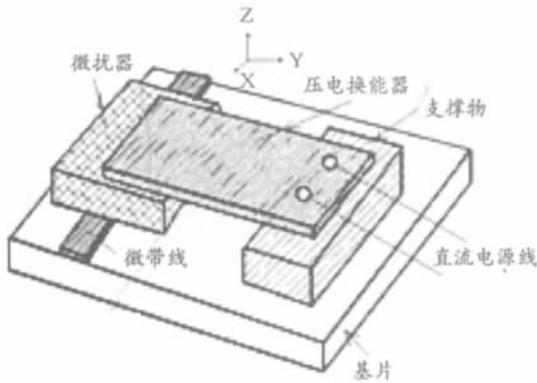


图 3 压电换能器可调微带滤波器的的工作原理

Fig.3 Work theory of piezoelectric transducer tunable microstrip line filter

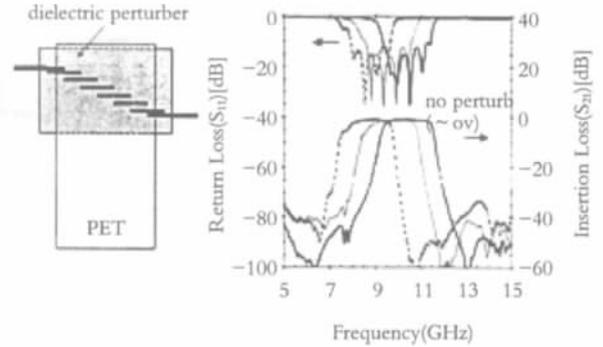


图 4 平行耦合线电调滤波器的俯视图和频响曲线

Fig.4 Top-view and measured S-parameters of parallel-coupled tuned filter

它电路连接,成本低等特点,但由于变容管的非线性和微带结构介质的不均匀给设计带来许多困难。

### 2.2 压电换能器电调谐滤波器

以压电换能器作为调谐元件是目前较为新颖的电调滤波器。Tae- Yeoul Yun 等<sup>[7]</sup>详细介绍了其调谐原理,并设计和制作了 7 级 1/2 波长平行耦合线带通滤波器。工作原理如图 3 所示。压电换能器上施加电压时,由于逆压电效应,微扰器随换能器产生沿 Z 方向(也可以是 XY 方向)的位移,位移的大小改变微带线的电磁场分布,从而改变由微带线构成的滤波器的中心频率。图 4 为带通滤波器的俯视图和测试结果。直流电压 0~60V 时,滤波器的频率调谐范围为 8.8GHz~11.2GHz。

为了增大调谐范围,可以通过减小基片的介电常

数来实现。用  $\epsilon_r=10.8$  和  $\epsilon_r=2.33$  的两种基片分别设计频率在 10GHz 附近的环形微带线电调滤波器,其调谐率分别为 14.7%和 28.5%,调谐率增加了近一倍。

这种电调滤波器虽然结构比较复杂,但很有发展潜力,因为压电换能器的压电参数可以通过改变陶瓷的组成进行大范围的调整,针对不同频段或不同调谐范围的滤波器,可以选择不同的压电换能器。

### 2.3 铁电薄膜电调滤波器

铁电薄膜电调滤波器是利用铁电材料的介电常数随外加电场非线性变化的特性制成的滤波器。常见的薄膜有酸锶钡(简称 BSTO)和钛酸锶(简称 STO)等。在铁电薄膜表面印刷或光刻某一特性阻抗值的微带线,当微带线的长度 L 一定时,如等于 1/4 波长时,

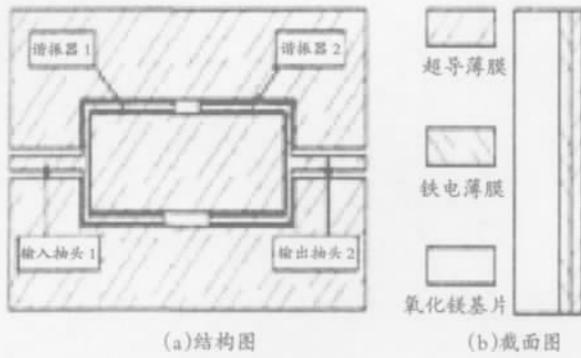


图 5 铁电薄膜可调滤波器结构示意图和仿真曲线

Fig.5 Structure and simulated S-parameters of ferroelectric thin film tunable filters

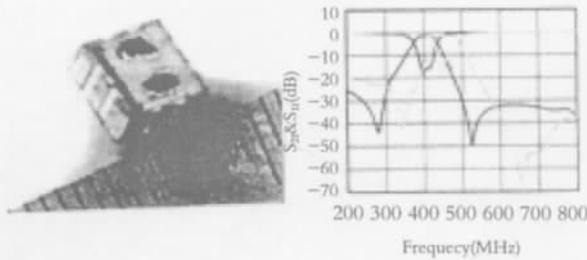
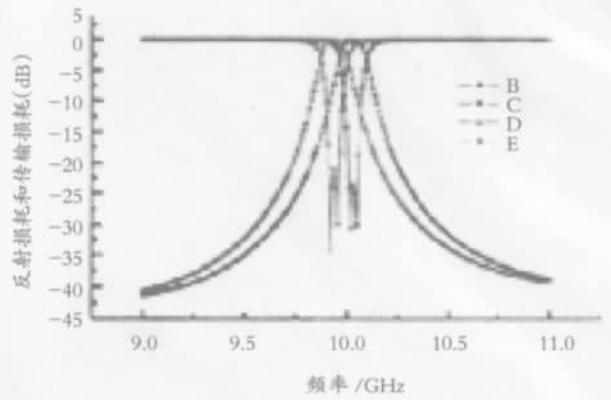


图 6 多层结构可调带通滤波器的实物图和测试曲线

Fig.6 Photograph and measured S-parameters of multi-layer tuned filter

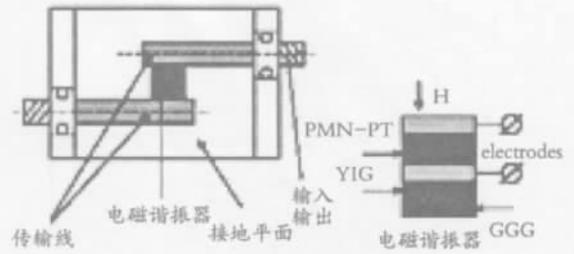


图 7 基于铁磁-铁电双层的电调滤波器结构示意图

Fig.7 Structure of tunable filters based on ferrite-ferroelectric bilayers

微带线的谐振频率  $f_0$  由下式给出。

$$f_0 = \frac{C}{4L\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

式中  $C$  为光速  $\epsilon_{eff}$  为微带线的有效介电常数, 当  $\epsilon_{eff}$  改变时  $f_0$  的值也发生改变。

张晓玲等<sup>[8]</sup>用电磁仿真软件 Sonnetsuites 设计了二阶铁电薄膜可调带通滤波器。图 5 为其结构示意图和仿真曲线, 当介电常数从 250 减小到 200 时, 频率调谐范围为 9.95~10.04GHz。

朱昀亮等<sup>[9]</sup>研究了铁电薄膜高温超导的电调特性, 在铝酸镧(LAO)基片上沉积 STO 薄膜和铋钡铜(YBCO)超导薄膜, 再光刻成所需的微带线图形, 用仿真软件 Ensemble 计算出电调微带线谐振器的频率调谐范围与器件结构参数的关系。仿真结果表明, 外加电场后上述微带线谐振器的谐振峰向频率的高端偏移, 这与公式(2)相吻合。

G.Subramanyam 等<sup>[10]</sup>用高温超导薄膜(HTS)、铁

电层和介质层制成 K 波段可调带通滤波器, 调谐率达 10%。

铁电薄膜可调滤波器具有结构紧凑, 尺寸小及施加偏压容易, 直流电压无方向性, 调谐的线性较好等优点。但薄膜的均匀性, 薄膜与基片的附着力等对电调特性影响很大。

### 3 滤波器结构

以上所述的电调带通滤波器基本上是微带线结构, 这种结构集成度高, 与外电路连接方便, 而且制作加工技术成熟, 但插入损耗较大。一种新型的电调微波带能滤波器的结构是采用多层陶瓷制成的。Mohammed Rahman 等<sup>[11]</sup>采用低温共烧陶瓷技术(LTCC)制作了用于移动手机的三段式(DCS, PCS 和 UMTS)3 级电调带通滤波器, 体积小(7.5×6.5×2.0mm<sup>3</sup>)插入损耗也小, 在可调范围内均小于 4.3 dB。

Keisuke Kageyama 等<sup>[12]</sup>分别用介电常数为 7.7 和 75 的介质陶瓷制成了多层结构的调谐范围 400~470 MHz 和 780~870 MHz 两级电调带通滤波器, 体积为  $5.6 \times 5.6 \times 3 \text{ mm}^3$ , 插入衰耗小于 2.0dB, 图 6 为其实物图和测试曲线。

铁氧体也可以制作电调滤波器, G. Srinivasan 等<sup>[13]</sup>设计和分析了电场调谐的由铁氧体(YIG)和压电陶瓷(PMN-PT)构成的微波带通滤波器。其工作原理是当压电陶瓷层上加上电压后, 由于压电陶瓷产生形变, 形变促使铁氧体谐振器的磁场强度发生偏移, 从而实现中心频率的改变。图 7 为结构示意图。当偏置磁场为 5KOe, 电场强度 0~100KV/mm 时, 中心频率变化范围为 9.3GHz~10.7GHz, 滤波器的带宽基本不变(80MHz), 插入衰耗均小于 2.5dB。

## 4 通带特性

电调带通滤波器的一个显著特点是通带的插入损耗、带宽和波动随调谐发生变化。从图 5 可以看出在调谐范围内压电换能器电调滤波器的频响特性( $S_{11}$  和  $S_{21}$ )变化很小。变容管电调滤波器的通带变化较大<sup>[5]</sup>, 这是由于谐振单元的电长度  $\theta$  对瞬时带宽  $B_L$  的影响很大, 它们之间有如下关系式<sup>[14]</sup>:

$$B_L = k \frac{\theta \cdot \tan(\theta)}{\tan(\theta) + \theta \cdot (1 + \tan^2(\theta))} \quad (3)$$

式中  $k$  是谐振单元几何尺寸有关的常数。当  $\theta \approx 53^\circ$  时,  $B_L$  有最大值。由于调谐时带宽变化, 因此, 通带的插入损耗和波动也发生相应的变化。文献[2-3]表明当  $\theta \approx 53^\circ$  时, 梳状线电调带通滤波器的通带在调谐频率范围内变化最小。

变容管的  $Q$  值对通带的插入损耗影响较大, 国内报道的变容管电调滤波器的插入损耗普遍偏大, 大多数超过 10dB<sup>[2-3]</sup>。这是因为国产的 Si 型和 GaAs 型变容管的  $Q$  值相对较低。

为了改善通带特性, B.W.Kim 等<sup>[15]</sup>研制了 2 级有源电调滤波器, 电调范围内(1.3~1.8GHz), 插入衰耗小于 1.5dB, German Torregrosa-Penalva 等<sup>[14]</sup>以 GaAs 场效应管(FET)代替变容管设计和制作了 X 波段(8~12GHz)宽带微带线电调滤波器; Z.M.Hejazi

等<sup>[16]</sup>采用变容管并联电感的方法设计了 2 级窄带(0.5%)电调滤波器, 电调范围内(0.92~1.01GHz), 带宽保持不变; Manuel Sanchen-Renedo 等<sup>[17]</sup>在相邻谐振器之间设置可改变耦合的变换器(reducers), 设计和制作了频率和带宽均可调谐的 2 级 UHF 波段梳状线电调滤波器。

## 5 发展趋势与展望

随着通信设备的小型化、智能化和数字化, 电调微波带通滤波器也要求体积小、重量轻、数字控制和温度稳定性高。不仅调谐速度要快、调谐范围要宽, 调谐的间隔可以控制, 在调谐过程中带通和插入损耗均保持不变或变化很小, 而且带数控制装置, 这将是未来电调带通滤波器的发展方向。

采用高  $Q$  值的微波介质材料和高温超导材料制作滤波器, 将使滤波器的通带插入损耗更小。

采用射频微电子机械系统(RF MEMS)技术<sup>[18-19]</sup>将实现电调微波滤波器的高度集成和高性能。

### 参考文献

- 1 刘伟, 谢显中. 电压调谐带通滤波器设计研究. 重庆邮电学院学报, vol. 16, no.2, Apr.2004
- 2 冯军. 变容管电调微波带通滤波器. 电讯技术, vol. 31, no.5, Oct.1991
- 3 史云涛, 钟鹏飞. 变容管电调谐微波带通滤波器的设计. 内蒙古大学学报(自然科学报), vol. 27, no.1, Jan.1995
- 4 袁建荣, 曹桂兴等. 电调微波带通滤波器的一种简单设计方法. 空间技术, no.3, 2005
- 5 曹良足, 王帅等. 数控电调带通滤波器的设计与制作. 电子元件与材料, vol. 26, no.4, Apr.2007
- 6 Andrew R. Brown, et al. A varactor-tuned RF filter. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2000, 48 (7): 1157~1160
- 7 Tae-Yeoul Yun, et al. Piezoelectric-transducer-controlled tunable microwave circuit. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2002, 50(5): 1303~1310
- 8 张晓玲, 孟庆端等. 基于共面波导传输线的铁电薄膜可调带通滤波器. 河南科技大学学报(自然科学版) vol. 27, no.4, Aug. 2006
- 9 朱响亮, 许伟伟等. 基于 YBCO/STO 的频率电调特性研究. 低

- 温物理学报, vol. 25(Suppl.), Oct.2007
- 10 G. Subramanyam, et al. A novel K-band tunable microstrip bandpass filter using a thin film HTS/ferroelectric/dielectric multiplayer configuration. 1998 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Digest 1998, 2: 1011~1014
  - 11 Mohammed Rahman, et al. Electrically tunable LTCC based multi-layer filter for mobile handset application. 2003 IEEE MTT-S Digest: 1767~1770
  - 12 Keisuke Kageyama, et al. Tunable active filter having multiplayer structure using LTCC. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2001, 49(12): 2421~2424
  - 13 G. Srinivasan, et al. Electrically tunable microwave filters based on ferromagnetic resonance in ferrite-ferroelectric bilayers. Electronics Letters, 2005, 41(10)
  - 14 German Torregrosa- Penalva, et al. A simple method to design wide-band electrically tunable combline filters. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2002, 50(1): 172~177
  - 15 B.- W. Kim, et al. Varactor-tuned active bandpass filter low noise performance. Electronics Letters, 2004, 40(15)
  - 16 Z. M. Hejazi, et al. Lumped-element microstrip narrow bandpass tunable filter using varactor-loaded inductors. Int. J. Electronics, 2003, 90(1): 57~63
  - 17 Manuel Sanchen-Renedo, et al. A new electrically tunable combline filter with simultaneous continuous control of center frequency and bandwidth. 2004 IEEE MTT-S Digest: 1291~1294
  - 18 张永华, 欧阳炜霞等. MEMS 集成滤波器技术. 传感器与微系统, vol. 27, no.7, July, 2008
  - 19 Eriv M. Prophet, et al, 王和军译. 采用 MEMS 技术高选择性、电子调谐式低温滤波器. 电子工业专用设备, vol. 135, no.4, Apr., 2006

## DEVELOPMENT OF ELECTRICALLY TUNABLE MICROWAVE BANDPASS FILTER IN COMMUNICATION

*Cao liangzu Wang shuai Lin cheng*

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramics Institute, Jingdezhen 333001)

### Abstract

Electrically tunable microwave bandpass filters have been used widely in microwave multichannel receivers and electric antagonism systems. Development of electrically tunable filters had been described. To counter design, structures and properties, tuning theory, tuning elements, microwave reality, passband characteristic had been summarized. The future prospects had been explored.

**Keywords** microwave filter, electrically tunable, varactor, piezoelectric transducer, ferroelectric thin film