

文章编号:1005-0523(2011)01-0007-08

超宽带滤波器的研究现状与进展

官雪辉¹, 陈鹏¹, 刘海文¹, 蔡鹏²

(1. 华东交通大学信息工程学院, 江西南昌 330013; 2. 江西财经大学软件与通信工程学院, 江西南昌 330013)

摘要:超宽带滤波器作为一种新型的滤波器,具有极宽的带宽,可实现高速数据传输,具有广阔的应用和发展前景。回顾了超宽带系统的发展历程,总结了近几年国内外关于超宽带滤波器的最新研究成果,并从超宽带滤波器的设计方法和电路特点等方面对其研究现状进行分析。从多个角度给出了超宽带滤波器的分类和构成,并就超宽带滤波器及具有带阻特性的超宽带滤波器进行详细论述和举例说明。最后对超宽带滤波器的发展趋势进行了展望。

关键词:超宽带滤波器;阻带;多模谐振器;LCP;LTCC

中图分类号:TN713.5

文献标识码:A

随着无线通信技术及无线多媒体业务的飞速发展,超宽带(UWB)技术受到越来越多研究人员的关注。超宽带以其高速度、低功耗、高保密性以及抗干扰能力强等优点,具有非常广阔的应用前景和相当巨大的市场价值。虽然美国军方以及航空界对于开放超宽带频段民用仍然存在着意见分歧,但是由于超宽带技术潜在的诱人的应用前景,美国联邦通讯委员会(FCC)于2002年2月批准了超宽带技术在短距离无线通信领域的应用^[1]。这为超宽带技术产品的商业化应用打开了大门,促进了超宽带系统及其器件研究的进展。由于超宽带技术可适用的领域十分广泛,为了便于管理,FCC将超宽带系统分为3类:①成像系统,包括地面穿透雷达系统、墙壁成像系统、墙壁穿透成像系统、监视系统和医疗成像系统;②车载雷达系统;③室内超宽带系统。对于不同的通信系统,FCC都划分了不同的使用频带范围。当前,各大研究机构最为关注的是室内超宽带系统的商业价值。根据FCC的规定,室内超宽带通信系统使用的频带为3.1 GHz~10.6 GHz。

作为射频前端的关键器件之一,超宽带滤波器性能的优劣直接影响整个通信系统的质量。为了适应微波集成电路小型化的要求,滤波器不仅要性能好,而且要体积小、结构紧凑,便于集成与互联。超宽带系统采用的是脉冲方式传输信息,由于脉冲信号产生和消失时间非常短暂,因此要求整个系统具有较小并平坦的群时延特性。作为超宽带系统的一部分,滤波器也必须满足此要求。射频低端大部分已被使用于现代无线通信中,因此FCC对低频端的使用有相当严格的要求。这要求超宽带系统对带外,尤其是对低频段有很好的抑制。这样就需要一个高性能的超宽带滤波器将带宽严格限制在FCC规定的范围内。而多系统,多制式的无线通信模式也使得超宽带系统必须面对更多,更复杂的问题,如WLAN系统5.2 GHz以及5.8 GHz频段均落在超宽带频带内。超宽带滤波器设计时,必须考虑如何降低和避免与现有部分系统间的干扰。

1 超宽带滤波器的国内外研究概况

超宽带技术的发展,促使新型超宽带滤波器也必须不断地诞生和发展。新技术、新工艺的出现使得超宽带滤波器的设计理论也不断丰富和完善。

目前国内外超宽带滤波器设计的主要方法有:

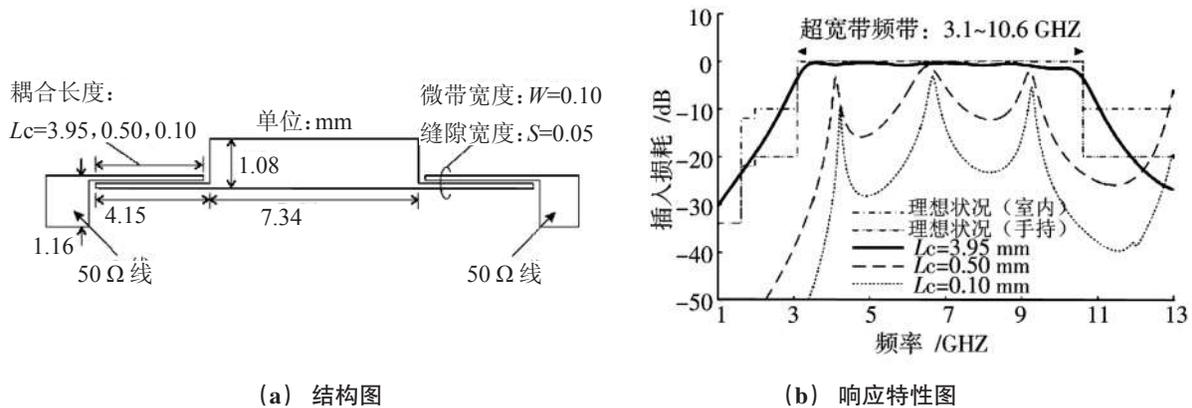
收稿日期:2010-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61061001);铁道部重点项目(2010X004-E)

作者简介:官雪辉(1976—),男,副教授,博士,研究方向为电磁场理论、射频微波电路与天线。

1.1 微带多模谐振器法

所谓多模谐振器是指在通带内有多个谐振模式的谐振器。多模谐振器有很多种形式,其中最早应用于超宽带滤波器的为半波长阶跃阻抗谐振器(SIR)^[4],如图1所示。其原理是利用SIR阻抗比和电长度来控制基频和谐波位置,使得谐振器的前3个谐振点分布于整个超宽带内。然后通过平行耦合线馈电,实现平坦的超宽带带通特性。为了得到较强的耦合,平行耦合线宽与间距为0.05 mm,普通加工工艺实现起来比较困难。滤波器带宽达到了要求,但是其边带不够陡峭,离FCC室外辐射掩蔽的要求还有差距。



(a) 结构图

(b) 响应特性图

图1 SIR多模谐振器超宽带滤波器

Fig.1 UWB BPF using SIR multiple-mode resonator

为了改善滤波器边带特性,有效方法之一就是提高滤波器的级数。而采用四模及四模以上的谐振器,使四个或更多谐振点落在超宽带内,可降低通带内插入损耗。一个四模谐振器可以用一个三阶SIR实现。与两阶SIR谐振器相比,这种谐振器具有更多的可控参量使得谐振器的实现更为简单,调整范围更广。另一种四模谐振器是在原有的SIR上加载短路枝节,在通带内增加谐振点。同时利用短路枝节的四分之一波长谐振在滤波器的上下阻带各产生一个传输零点,改善了阻带特性^[6]。

除了SIR构成的多模谐振器外,另一种形式的多模谐振器为开路半波长枝节加载谐振器。为了增强输入输出耦合,以及减小电路体积,文献[9]采用了短路枝节加载以及交指耦合结构。该方法实现的超宽带滤波器通带内波纹小,回波损耗很低^[9]。由于利用多模谐振器构成超宽带滤波器的方法是一种相对简单,而结构又紧凑的方案,因此国内外很多学者对这种方法进行了研究与探索,并设计出了很多形式的滤波器^[7-12],但由于大多采用单个谐振器,滤波器的边带不够陡峭。同时为了实现输入/输出与谐振器间的强耦合,需要两者间的间隙宽度很小,对加工工艺要求苛刻。

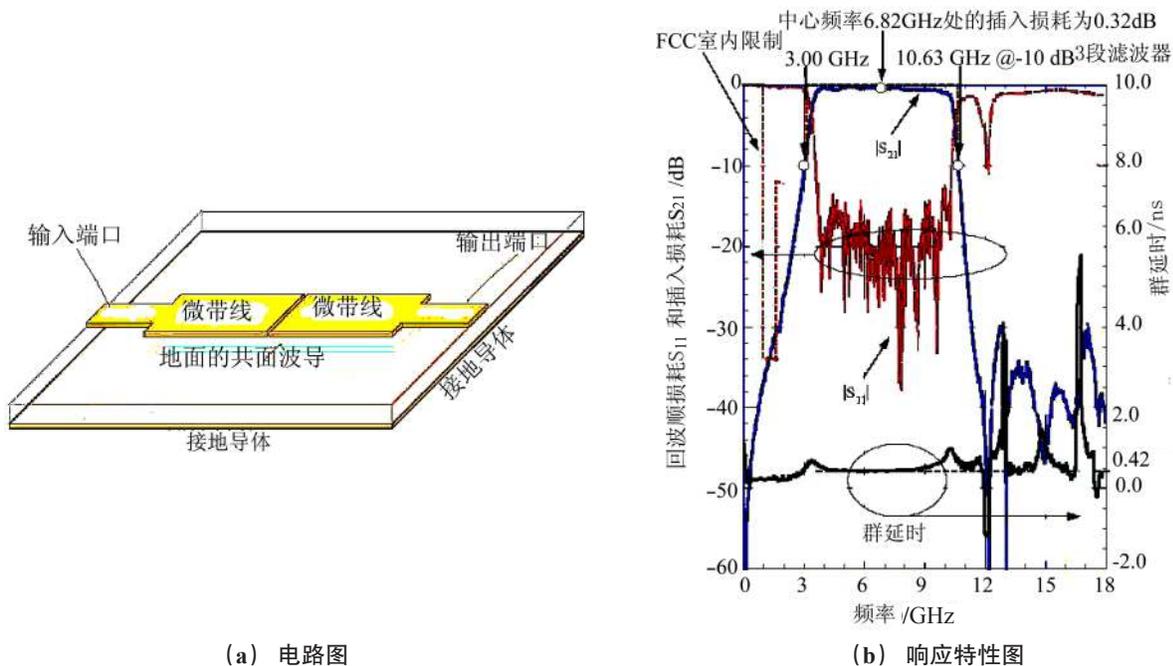
1.2 混合微带/共面波导法

微带与共面波导混合结构可充分利用微带线上下两层空间,使电路更加紧凑。同时,微带与共面波导正对,两者间的电磁场耦合非常强,可方便实现所需要的强耦合。常见的混合结构是微带馈电共面波导谐振器超宽带滤波器^[13],如图2所示。电路采用微带馈线,同时引入了源负耦合,从而在上下阻带产生了2个零点。传输零点使阻带更加陡峭,基本满足了FCC室外辐射掩蔽的要求。宽边耦合结构在通带内产生了3个极点,使得滤波器通带内反射损耗降低。滤波器通带内群延时特性也较为平稳。另一种常用的混合结构是共面波导馈电,微带谐振器产生通带^[14]。共面波导的间隙宽度影响传输线特性阻抗,从而可用来改变耦合线的阻抗,来控制谐振器各谐振峰的位置。然而共面波导馈电很难实现源负耦合,从而阻带特性不如微带馈电的滤波器。微带/共面波导混合结构可以结合多模滤波器设计方法,可以得到结构更紧凑的滤波器^[13-17]。这种方法同多模谐振器一样,都是采用单级谐振器,因此仍存在着阻带特性不够好的问题。

1.3 滤波器级联方法

滤波器级联技术是实现超宽带的较为简单和有效的方法。通过把一个高通滤波器和一个低通滤波器串联,实现超宽带特性。这种方法实现的电路简单,方法比较直观,同时实现的滤波器阻带比较宽。但是

由于电路中有2个滤波器,因此体积比较大,通带内的插入损耗很大^[18-19]。图3给出了一种高/低通滤波器级联的超宽带滤波器。2个滤波器直接串联时,电路体积比较大。为了有效利用电路,文献[18]把高通滤波器电路参数嵌入到低通滤波器中,使得电路尺寸大大减小。但是两电路融合后之间的影响还有待进一步研究。

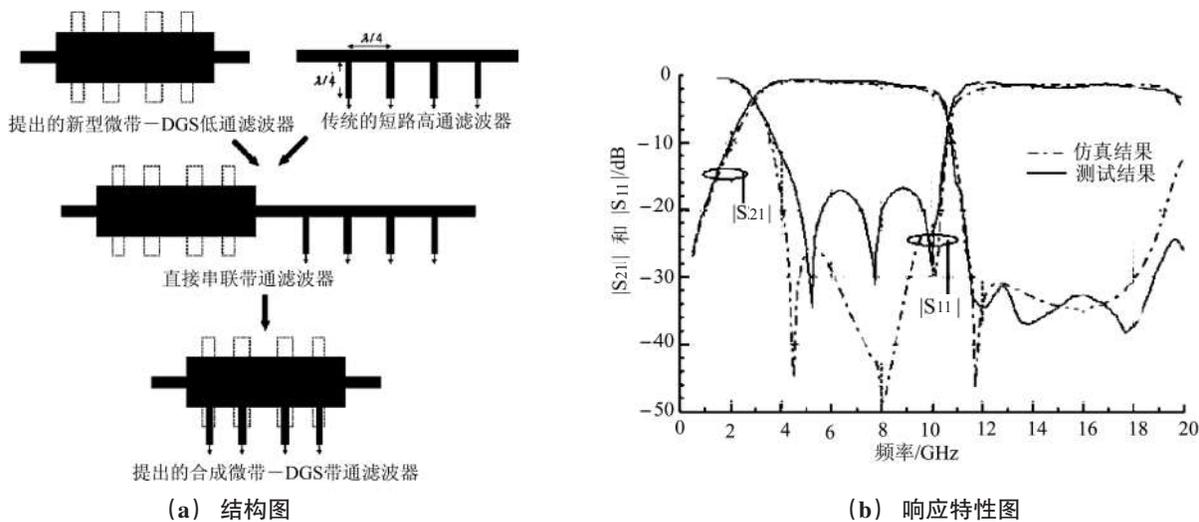


(a) 电路图

(b) 响应特性图

图2 微带/共面波导混合结构超宽带滤波器

Fig.2 Hybrid microstrip/coplanar waveguide UWB BPF



(a) 结构图

(b) 响应特性图

图3 高通与低通滤波器串联的超宽带滤波器

Fig.3 Cascaded high-/low-pass filters

1.4 超宽带滤波器综合理论

由于超宽带滤波器的相对带宽达到了110%,远远超过传统滤波器综合法适用范围。因此探索新型超宽带滤波器的综合技术显得尤为重要。单级耦合式多模超宽带滤波器虽然方法简单易用,但是阻带衰减远难以满足FCC的规定。另外,耦合结构式超宽带滤波器的综合中的耦合理论和模式理论也不够成熟。传输线级联式电路实现超宽带滤波器有其独特的优势,因此基于这种结构的Z域变换算法综合理论应运而生^[2,20-23]。基于Z变换技术的综合理论主要是利用网络分析理论分析滤波器结构,得到Z域的理想传输函数,并推导链形散射矩阵,运算得到实际传输函数 $T(z)$,最后利用优化算法得到各连接线以及短路线的特性阻抗^[2]。如图4(a)是一种三级超宽带滤波器电路模型。图4(b)为零点优化后的滤波器频率响应。这

种综合方法设计出来的滤波器虽然阻带特性很好,但是体积偏大,且只适用于开路枝节并联微带电路。

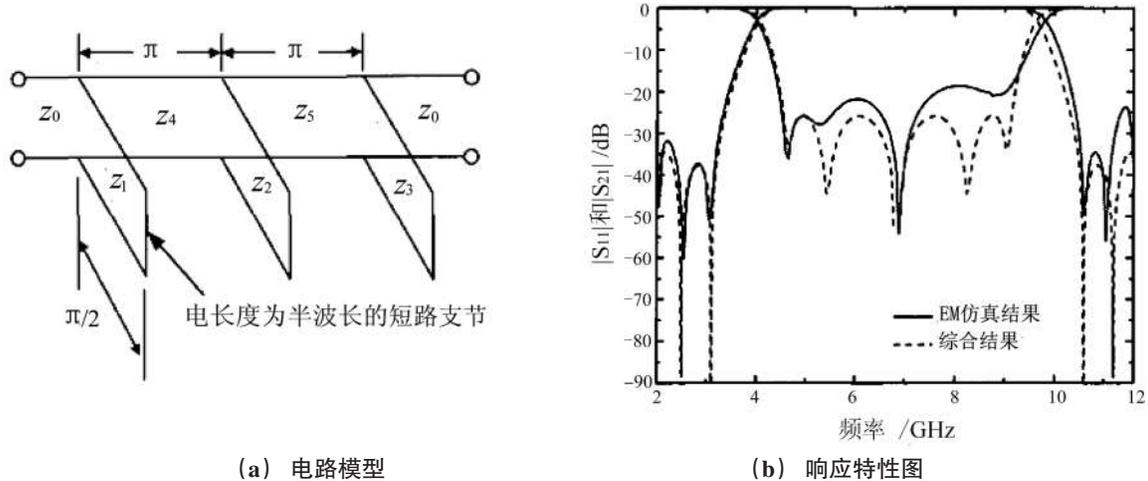


图4 三级超宽带滤波器
Fig.4 Three-poles UWB BPF

1.5 低温共烧陶瓷(LTCC)以及液晶聚合物(LCP)技术

作为微波新兴材料的代表,LTCC和LCP两种材料无论是导热性、Q值等物理特性,还是便于制作高密度的多层电路的结构特性,都远远优于传统的PCB板材^[24-29]。LTCC电路可以充分利用立体空间,其设计思路与微带线等平面结构截然不同。图5(a)为一个LTCC超宽带滤波器3-D结构图。它由3层、4部分容性耦合带线结构组成,其中包扩两个四分之一波长开路T形谐振器以及一个四分之一波长短路线和输入输出馈线^[25]。利用半波长短路输入/输出馈线在上下阻带产生了两个传输零点,使得阻带滚降特性良好。图5(b)为其仿真以及测试结果比较图。整个滤波器结构非常紧凑,且带外的多个传输零点使得滤波器阻带滚降特性非常好。

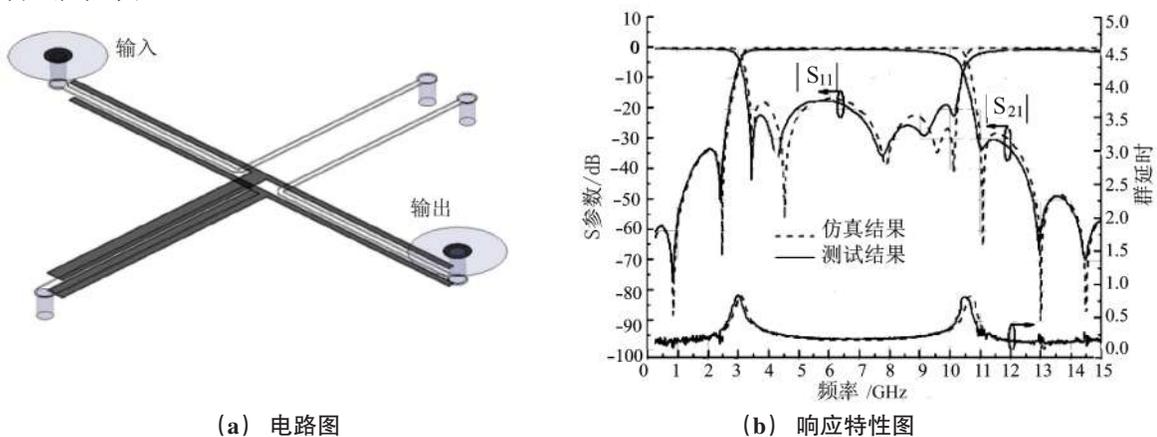


图5 LTCC超宽带滤波器
Fig.5 LTCC UWB BPF

液晶高分子聚合物(Liquid Crystal Polymer, LCP)是80年代初期发展起来的一种新型高性能工程塑料。由于其非常好的物理学特性,奠定了工程塑料的代表地位,也是超越现有塑料材料界限的工程材料。由于其具有类似于陶瓷片的高介电常数、高Q、良好的热传导性等优良特性,基于这种材料的多层结构电路是超宽带滤波器最新研究热点之一。多层微波电路设计通常采用分布参数法和集总参数法。文献[25]中用分布参数法实现了一个新型椭圆函数特性超宽带滤波器。集总参数法是通过集总参数电路模型来设计实际的电路。图6所示为一基于集总参数的超宽带滤波器^[26]。在微带电路共有3层,2层基板。第1层基板为LCP,第2层为PCB板。利用容性耦合贴片等效集总电路中的电容,高阻抗短截线实现集总参数电感。电路对称点的接地电感由通孔接地实现。由于多层电路不仅体积小,而且具有高性能、便于集成等诸多优势,因此是未来无源电路的发展趋势。

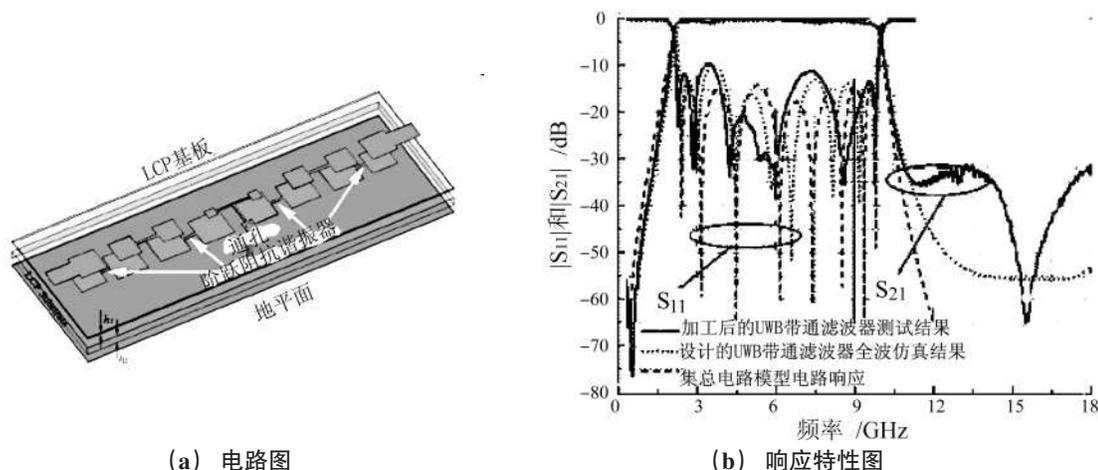


图6 LCP超宽带滤波器
Fig.6 LCP UWB PBF

2 具有陷波特性的超宽带滤波器研究现状

近几年来,随着超宽带通信的发展,其与现有通信系统特别是无线局域网间的干扰问题越来越受到重视。因此,设计具有带阻特性的超宽带滤波器成为国内外学术界、工业界的最新研究热点之一。

2.1 嵌入开路短截线法

嵌入式开路短截线由于其结构紧凑,设计简单,被广泛应用于各种微带电路中。这种嵌入式开路短截线电长度为四分之一波长^[30-32],该结构可设计在在馈线或者谐振器内,充分利用了电路空间。图7是一个混合微带线基片集成波导(SIW)的超宽带滤波器^[30]。该滤波器采用的是高通滤波器与低通滤波器级联的方法构成的。电路的左边部分是微带低通滤波器,右边是SIW高通滤波器部分。嵌入式短截线位于连接微带和SIW的过渡线上。然而与其他方法相比,嵌入式开路短截线产生的阻带仍旧不够陡峭。

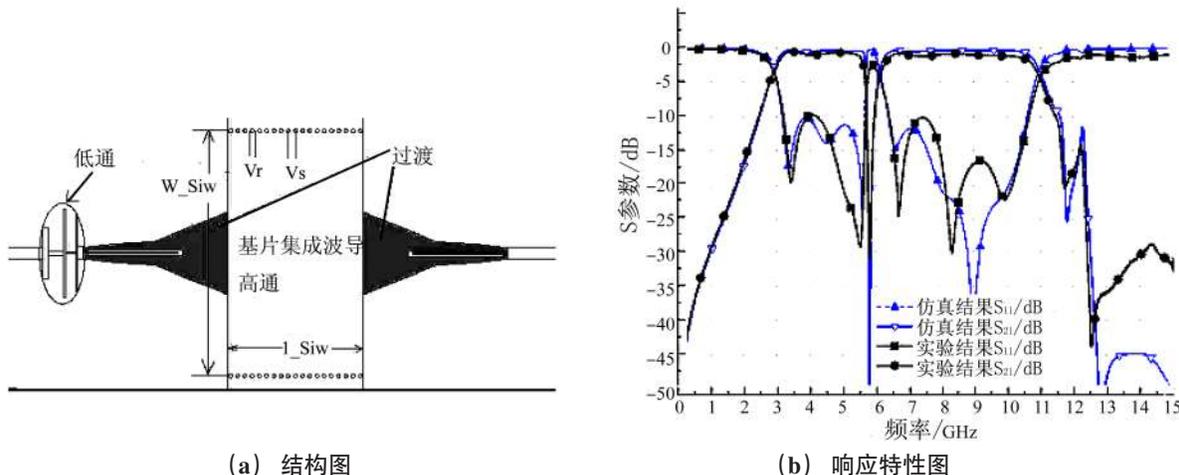


图7 嵌入式短截线产生阻带超宽带滤波器

Fig.7 Notch-band UWB BPF using embed stud

2.2 非对称输入输出耦合结构法

非对称输入输出耦合结构一般在交指结构中较为常用。这种结构不但能增强谐振器与馈线间的耦合强度,还能产生可控的阻带^[33-35]。阻带位置由交指线的电长度差决定。图8为基于圆片谐振器和非对称输入输出耦合馈线的超宽带滤波器。非对称耦合线的长度差控制阻带位置分别为4.3 GHz和8 GHz分别为阻带的基波和谐波。这种方法实现的超宽带滤波器阻带不够陡峭,且非对称输入输出耦合馈线结构的谐波多,并且谐波难以控制,容易对其余通带产生影响。因此适用范围不广。

2.3 耦合谐振器加载法

耦合加载谐振器的形式非常多,包括微带谐振器和缺陷地结构谐振器等。加载的谐振器形状多样,有环形,发夹形和螺旋形等^[36-37]。图9所示为SIR加载式具有带阻特性的超宽带滤波器^[36]。这种加载方式可以实现较为陡峭的阻带特性。但是由于谐振器处于电路外,会额外增加电路的体积。只有当加载的谐振器与原滤波器电路谐振器最好是在不同层中,才可以有效利用电路空间,达到小型化的要求。

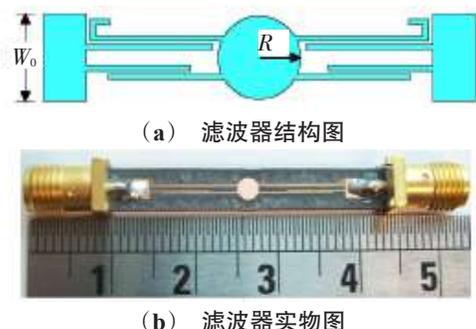


图8 非对称输入输出耦合产生阻带超宽带滤波器
Fig.8 Notch-band UWB BPF using asymmetrical input/output coupling

图10所示是一个单裂环谐振器加载式超宽带滤波器。该电路在微带滤波器的接地面上加载缺陷地结构谐振器,在超宽带中产生一个阻带。电路充分利用了微带上下两层结构,外加谐振器并没有增加原有电路的体积^[37]。这种方法可以应用于微带以及SIW等很多种传输结构中,加载形式和级数也灵活多变,因此是目前最受关注的新方法。



(a) 结构图

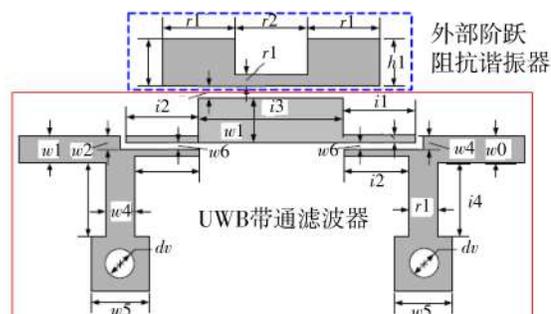
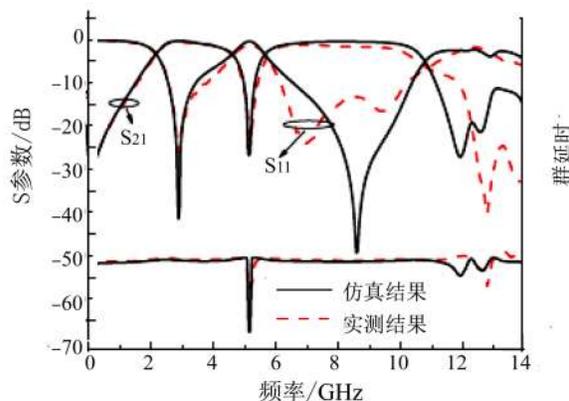


图9 SIR加载产生阻带超宽带滤波器
Fig.9 Notch-band UWB BPF using external SIR



(b) 响应特性图

图10 CSRR加载产生阻带超宽带滤波器
Fig.10 Notch-band UWB BPF using CSRR

3 超宽带滤波器的发展趋势

目前对于单谐振器构成的超宽带滤波器的研究已经趋于成熟。多个滤波器串联构成超宽带滤波器的方法,由于其体积大,限制了其应用范围。采用参差电路结构实现可以降低滤波器体积,但是电路融合后的相互影响问题有待进一步研究。多模谐振器构成的超宽带滤波器,由于结构紧凑、成本低廉和实现方法多样等优点,已经被国内外学者广泛的研究与使用。以Z变换技术为代表的超宽带滤波器综合技术为超宽带滤波器的综合理论发展提供了新思路,并将推动超宽带滤波器综合理论的发展。多层结构的超宽带滤波器仍旧是有待探索的领域,特别是LTCC超宽带滤波器,由于其体积小、Q值高和便于集成等优异性能,越来越受到关注。有阻带特性的超宽带滤波器也将是超宽带滤波器发展的主要方向。本文总结的3种方法中,嵌入式短截线由于其很容易嵌入到电路中,所以是一种最为常用的方法。而非对称输入输出馈线由于其只能适用于交指

耦合结构,而且谐波难以控制,所以其应用受到了限制。而谐振器加载方法形式多样,阻带特性十分陡峭,并且可应用于多层电路中,因此是带阻特性超宽带滤波器发展的新趋势。随着LTCC,LCP等新技术,新材料的不断诞生,以及新方法,新需求的不断出现,超宽带滤波器的研究将更加广泛和深入。而超宽带无线通信系统也将是未来数字化家庭以及探地雷达等领域的主流系统,必将进一步推动超宽带滤波器的理论和应用研究。

参考文献:

- [1] Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems [R]. USA:FCC,2002.
- [2] 蔡鹏.超宽带带通滤波器的设计理论及其小型化研究[D].上海:上海大学,2006.
- [3] HAO Z,HONG J. Ultra wideband filters technologies [J]. IEEE Microwave Magazine,2010,11(4):56-68.
- [4] ZHU L,SUN S,WOLFGANG M. Ultra-Wideband(UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2005,15(11):796-798.
- [5] CAI P. Design of ultra-wideband bandpass filter using step-impedance four-mode resonator and aperture-enhanced coupled structure [J]. Microwave and Optical Technology Letters,2008,50(3):696-699.
- [6] WONG S,ZHU L. Quadruple-mode UWB bandpass filter with improved out-of-band rejection [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2009,19(3):152-154.
- [7] HAN L,WU K,ZHANG X. Development of packaged ultrawideband bandpass filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2010,58(1):220-228.
- [8] LI R,ZHU L. Compact UWB bandpass filter on hybrid microstrip/slotline structure with improved out-of-band performances [C]//International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology,Chendu,China,2010:6-9.
- [9] GUAN X,JIANG S,CHEN P,et al. An ultra-wideband bandpass filter using cross-shaped triple-mode resonator [C]//International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology,Chendu,China,2010:559-561.
- [10] PACKIARAJ D,RAMESH M,KALGHATGI A. Ultra wide band filter with wide stop band [J]. Microwave and Optical Technology Letters,2007,49(2):436-439.
- [11] CHEN Y,CHANG S,WEI C,WANG Y,et al. Packaged ultra-wide-band bandpass filter based on inverted-T multiple-mode resonators and inverted-F impedance transformers [J]. IEEE Microwave Magazine,2010,11(1):126-129.
- [12] CHEN L,LEE C,CHUNG I H SU. Novel UWB BPF design using modified trisection MMR [J]. Microwave and Optical Technology Letters,2008,50(11):2904-2907.
- [13] LI K,KURITA D,MATSUI T. A novel UWB bandpass filter and its application to UWB pulse generation [C]//IEEE International Conference on Ultra-Wideband,Zurich,Switzerland,2005:446-451.
- [14] HU H L,HUANG X D,CHENG C H. Ultra-wideband bandpass filter using CPW-to-microstrip coupling structure [J]. Electronics Letters,2006,42(10):586-587.
- [15] THOMSON N,HONG J. Compact ultra-wideband microstrip/coplanar waveguide bandpass filter [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2007,17(3):184-186.
- [16] KUO T,LIN S,CHEN C. Compact ultra-wideband bandpass filter using composite microstrip-coplanar-waveguide structure [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2006,54(10):3772-3778.
- [17] XU H,WANG G,ZHANG C. Fractal-shaped UWB bandpass filter based on composite right/left handed transmission line [J]. Electronics Letters,2010,46(4):285-287.
- [18] HSU C,HSU F,KUO J. Microstrip bandpass filters for ultra-wideband(UWB) wireless communications [J]. IEEE MTT International Microwave Symposium Digest,2005(3):679-682.
- [19] ROBERTO G,JOSÉ I,ALONSO. Systematic method for the exact synthesis of ultra-wideband filtering responses using high-pass and low-pass sections [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2006,54(10):3751-3764.
- [20] CHEN C,NIHEI H,MA Z,et al. Synthesis of compact UWB bandpass filter with improved performances [J]. Microwave and Optical Technology Letters,2010,52(6):1268-1271.
- [21] TSAI L,CHEN K,HSUE C. Design of wide-band band-pass filters using discrete-time domain techniques [J]. Microwave and Optical Technology Letters,2004,43(5):264-266.

- [22] HONG J, SHAMAN H. An optimum ultra-wideband microstrip filter [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 47(3): 230-233.
- [23] 高阳. 超宽带滤波器的研究与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [24] 夏雷. 微波毫米波LTCC关键技术研究 [D]. 成都: 同济大学土木工程学院, 2008.
- [25] DUONG T, IHN S. New elliptic function type UWB BPF based on capacitively coupled $\lambda/4$ open T resonator [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(12): 3089-3098.
- [26] HAO Z, HONG J. Ultra wideband bandpass filter using embedded stepped impedance resonators on multilayer liquid crystal polymer substrate [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 18(9): 581-583.
- [27] HAO Z, HONG J. Ultra-wideband bandpass filter using multilayer liquid-crystal-polymer technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(9): 2095-2100.
- [28] HAO Z, HONG J. Compact wide stopband ultra wideband bandpass filter using multilayer liquid crystal polymer technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, 19(5): 290-292.
- [29] RUIZ C, ZHANG J, ZAKI Y, et al. Ultra-wideband LTCC ridge waveguide filters [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(2): 115-117.
- [30] QIN W, HONG W, TANG H, et al. Design and implementation of UWB bandpass filter with a frequency notch for choking back the interference from narrow band wireless communication systems [C]//*IEEE International Conference on Ultra-wideband*, Vancouver, Canada, 2009: 521-524.
- [31] SHAMAN H, HONG J. Ultra-wideband (UWB) bandpass filter with embedded band notch structures [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(3): 193-195.
- [32] LI Q, LIANG C, ZHANG W, et al. Novel compact UWB bandpass filter with notched band [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 52(2): 280-283.
- [33] SONG K, XUE Q. Compact ultra-wideband (UWB) bandpass filters with multiple notched bands [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, 20(8): 447-449.
- [34] SHAMAN H AND HONG J. Asymmetric parallel-coupled lines for notch implementation in UWB filters [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(7): 516-518.
- [35] 陈鹏, 魏峰, 黄丘林, 等. 一种具有陷波特性的超宽带带通滤波器[J]. *微波技术*, 2008, 24(s): 129-132.
- [36] CHEN C, TAKAKURA Y, NIHIE H, et al. Design of compact notched UWB filter using coupled external stepped-impedance resonator [C]//*Asia-Pacific Microwave Conference*, Singapore, 2009: 945-948.
- [37] LI Q, LI Z, LIANG C, et al. UWB bandpass filter with notched band using DSRR [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(10): 692-693.

Research and Development of Microwave Ultra-wideband Bandpass Filter

Guan Xuehui¹, Chen Peng¹, Liu Haiwen¹, Cai Peng²

(1. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Software and Communication Engineering, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China.)

Abstract: As a new type of filters, ultra-wideband (UWB) filters can realize high-speed data transmission. Thus, they have broad prospect in application and development. The history of UWB system is reviewed, and recent development of UWB filter is summarized. The research status of UWB filter is analyzed via design methods and circuit configurations. The classification and form of UWB filters are given. Characteristics of the UWB filter and UWB filter with notch band is discussed in detail and examples are given. Finally, the development trend of UWB filter is discussed.

Key words: UWB filter; notch band; LTCC; LCP