

基于微带三模谐振器的超宽带带通滤波器设计*

何宇红 马哲旺 杨雪霞

(上海大学通信与信息工程学院 上海 200072)

摘要: 提出一种基于微带三模谐振器的超宽带带通滤波器设计。该滤波器由一个中心加载阶跃阻抗开路枝节的三模谐振器,及两组用于抑制谐波的新型哑铃型缺陷地结构组成。使用交指型馈电方式及在馈电处的地板开槽实现超宽带需要的的强耦合,利用缺陷地结构抑制高次谐波实现良好的阻带特性。仿真结果表明,所设计的滤波器通带3 dB相对带宽达到80%(4.06~9.48 GHz),通带内插入损耗小于0.58 dB,回波损耗大24 dB,通带外10 dB阻带覆盖到30 GHz,通带两侧附近均有一个传输零点,获得了陡峭的通带边缘,较好地实现了美国联邦通信委员会(FCC)授权的超宽带通信系统的频谱使用要求。该滤波器结构简单,谐振器自身尺寸小于中心频率下 $0.5\lambda_g \times 0.5\lambda_g$ 。最小带线和最小缝隙宽度均不小于0.1 mm,易于低成本加工,具有较高的实用价值。

关键词: 超宽带滤波器;微带三模谐振器;缺陷地;阶跃阻抗;谐波抑制

中图分类号: TN713 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Design of ultra-wideband bandpass filter using microstrip three-mode resonator

He Yuhong Ma Zhewang Yang Xuexia

(School of Electronic Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper proposed a novel ultra-wideband (UWB) bandpass filter (BPF) based on microstrip multi-mode resonator. The filter consists of a microstrip stub-loaded three-mode resonator and a pair of novel dumbbell-shaped defected-ground structure for harmonic suppression. In addition, the stub of the three-mode resonator is modified into a step-impedance stub to achieve the desired band width. A cross-finger feeding structure with a background-aperture compensation technique is also used in this filter design to strengthen the energy coupling. The simulated results of the proposed UWBBPF show a 3 dB passband with a fractional bandwidth over 81.8% (within 4.04~9.63 GHz), insertion loss lower than 0.2 dB, return loss over 24 dB and 10 dB stopband extending to higher than 30 GHz. The passband of the BPF also shows a very sharp skirt property because of the transmission zeros at both the lower and upper side of the passband. The UWB spectrum mask issued by the Federal Communication Commission (FCC) is satisfied well by the designed BPF. The structure of the proposed UWB BPF is quite compact (smaller than $0.5\lambda_g \times 0.5\lambda_g$ at the central frequency) and easy to fabricate at low cost because its minimum strip-width and minimum gap-width are both 0.1 mm.

Keywords: ultra-wideband filter; microstrip tri-mode resonator; defected-ground structure; step-impedance; harmonic suppression

1 引言

超宽带通信由于其数据传输率高,抗干扰性强,通信成本低等优势,自2002年美国联邦通信委员会(FCC)正式授权3.1~10.6 GHz的超宽带(ultra-wide band, UWB)通信频谱的民用许可以来,受到了广泛关注。超宽带滤波器用于在所分配的频段内将信号功率限制在指定的范围内,排除信号间的干扰,从而保证通信质量与安全、提高频谱利用

率,因此在超宽带通信系统中起着至关重要的作用。

基于微带线传输结构实现超宽带带通滤波器(UWB BPF)的方法主要包括^[1]:高低通滤波器级联技术^[2]、微带结合共面波导技术^[3]、优化短路枝节线技术^[4]和多模谐振器技术^[5-8]。多模谐振器(multi-mode resonator, MMR)由于其能够在在一个谐振器内产生多个谐振模式,从而在实现超宽带宽的同时减少级联的谐振器个数,结构简单,插入损耗低,被广泛应用于超宽带滤波器的设计中。在文献[6]

收稿日期:2016-09

* 基金项目:国家863项目(2015AA016210)资助

中,一种中心加载开路枝节的双模谐振器被应用于超宽带滤波器的设计中,该滤波器通带频率选择性较差,且增加滤波器级数才能改善通带矩形系数。在文献[7]中,通过在中心位置加载两个长短不同的开路枝节实现了三模谐振器,但相对带宽较窄(30%)。而文献[8]同时使用了中心加载开路和短路枝节,结构复杂增加了加工难度和误差。另一方面,高次谐波的存在一直是微带多模谐振器存在的一大问题。为了提高滤波器带外抑制和通带频率选择性,如何在微带滤波器中抑制谐波拓宽阻带带宽也是设计 UWB BPF 中的一个重要研究课题^[9-11]。

在此背景下,本文提出了一个基于中心加载枝节的微带三模谐振器的超宽带滤波器设计。在第2节首先给出所提出的新型微带多模谐振器的结构及其谐振频率近似计算公式,该多模谐振器由一个普通半波长微带谐振器和一个加载在该半波长谐振器中心位置处的阶跃阻抗开路微带枝节组成,再通过奇偶模分析法,结合传输线方程计算得到它的谐振点和尺寸参数的关系公式。实验结果表明通过调整半波长谐振器和枝节的结构参数,可以使得三个谐振模式,即一个奇模两个偶模均匀分布在所需通带内,其中奇模由半波长谐振器的电长度决定,而两个偶模则可通过改变枝节低阻抗部分的长和宽可以实现单独调节,大大增加了滤波器带宽设计的灵活性。基于第2节中提出并分析的多模谐振器,第3.1节设计了一个微带超宽带带通滤波器,该滤波器相对带宽达约到84.5%,带内插损较低,矩形系数良好,满足 FCC 规定的室内通信频段的通带特性要求,但带外性能不够理想,10 dB 阻带不到 15 GHz。为了进一步改善该超宽带滤波器的上阻带特性,在3.2小节中应入一种具有低通特性的哑铃型缺陷地结构来改善其带外特性,为了获得更小的插入损耗,对该缺陷地结构进行了改进,通过在50 Ω 微带馈线的下方加入该改进的缺陷地结构,微带谐振器的高次谐波得到了有效抑制,在此基础上设计了一个具有超宽阻带的超宽带带通滤波器。仿真结果表明,改进后的超宽带滤波器的上阻带性能得到明显改善,10 dB 阻带延伸至 30 GHz 以上,且通带性能保持良好,较好地满足了 FCC 规定的超宽带室内通信频谱使用要求。由于只用了一个三模谐振器,该超宽带滤波器尺寸很小,同时由于所有结构参数都大于 0.1 mm,易于低成本加工,具有较高的实际应用价值。

2 阶跃阻抗枝节加载的三模谐振器的特性

本设计中采用的微带中心枝节加载的多模谐振器如图1所示,图1(a)为中心加载均匀阻抗枝节谐振器,图1(b)为中心加载阶跃阻抗枝节谐振器。对于图1(a)的中心加载均匀阻抗枝节谐振器,使用全波三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 和相对介电常数为 9.8,厚度为 0.635 mm 的 Rogers TMM 10i (tm) 微带线介质基板对其进行仿真实验,得到该谐振器的频率响应随枝节长度变化的趋势如图2所示。

其中 $W_1=0.1$ mm, $W_2=0.2$ mm, $L=10$ mm。当中心枝节的长度 h 较短($h<L/2$)时,该谐振器有两个谐振模,同时在谐振频率高端有一个传输零点。延长中心枝节的长度到 $h>L/2$ 时,可以实现三模谐振,即由双模谐振器变为三模谐振器,同时在谐振频率低端又有一个传输零点,相比双模谐振下可以获得更好的通带频率选择性。为了验证该实验结果,根据该结构的对称性使用奇偶模分析法^[7],并结合传输线理论,分别计算在奇模激励和偶模激励下谐振器的输入阻抗,得到 3 个谐振频率的近似计算公式。当中枝节微带线宽度为水平线宽度的两倍时,可以近似得到 3 个谐振频率与其结构参数与之间的关系如式(1)~(3)。

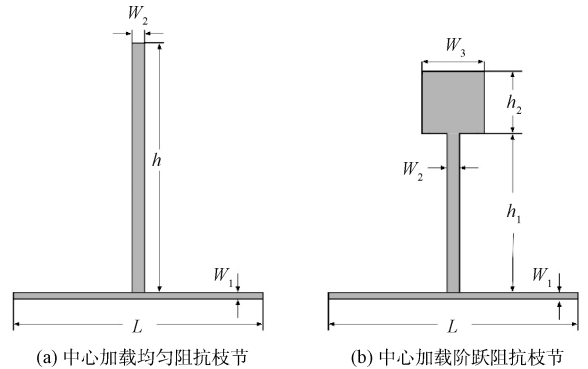


图1 中心枝节加载的多模谐振器

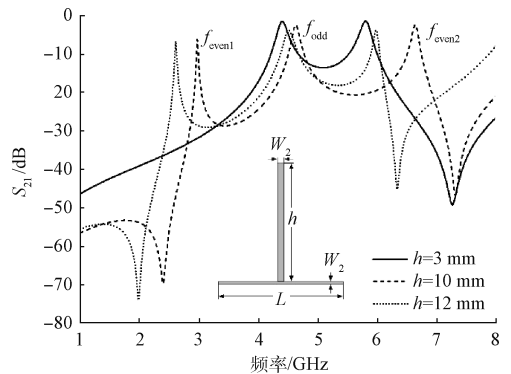


图2 中心加载均匀阻抗枝节的多模谐振器谐振频率随中心枝节长度的变化
($W_1=0.1$ mm, $W_2=0.2$ mm, $L=10$ mm)

$$f_{\text{odd}} = \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (1)$$

$$f_{\text{even1}} = \frac{c}{(L+2h) \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2)$$

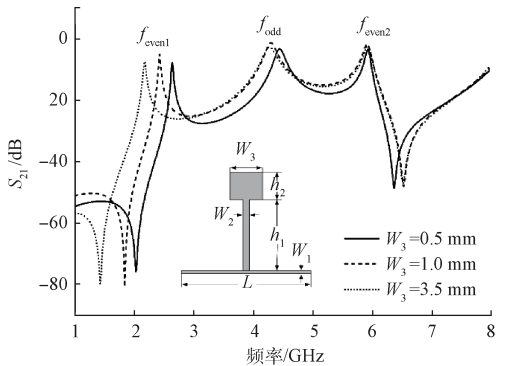
$$f_{\text{even2}} = 2f_{\text{even1}} \quad (3)$$

式中: c 是自由空间下的光速, ϵ_{eff} 是微带线介质基板的有效介电常数, L 是水平线的长度, h 是中心枝节长度。

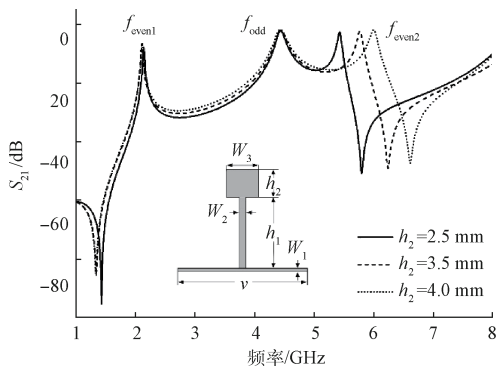
从上述式(1)~(3)可以看出,该三模谐振器的奇模频率(f_{odd})主要由水平线长 L 控制,不受枝节线长 h 的影响,而两侧的偶模频率则可以通过枝节长度 h 控制。因而可以

在不改变奇模频率的情况下,通过调整枝节长度 h 来改变两个偶模频率的位置,从而改变滤波器的带宽。发现图 2 所示的谐振器频率响应中随着枝节的延长,奇模两侧的偶模会同时向低频段移动,以及式(3)中 $f_{\text{even}2}$ 始终与 $f_{\text{even}1}$ 存在着倍频关系(实际上由传输线理论得到的近似关系 $f_{\text{even}2} = 2f_{\text{even}1}$ 与考虑了各种电磁影响的仿真软件得到的计算结果存在一定偏差,但 3 个谐振频率随谐振器结构参数的变化趋势与公式保持一致),两者无法单独调节,限制了滤波器带宽设计的范围和自由度。

为了改进这一问题,本设计将中心加载的均匀阻抗开路枝节改为阶跃阻抗结构,如图 1(b)所示,通过增加枝节部分的结构参数,增加改变多模谐振器谐振频率的自由度,从而提高滤波器带宽设计的灵活度和范围^[11]。对此使用前述介质基板,在电磁仿真软件中的得到计算结果如图 3(a)和(b)所示,其中 $W_1 = 0.1 \text{ mm}$, $W_2 = 0.2 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$, $h_1 = 5.8 \text{ mm}$ 。可见增加低阻抗部分的宽度 W_3 可以让 $f_{\text{even}1}$ 向下频段移动,同时 $f_{\text{even}2}$ 基本保持不变;增加其长度 h_2 则可以让 $f_{\text{even}2}$ 向上频段移动,而 $f_{\text{even}1}$ 基本保持不变。与图 2 所示的中心加载均匀阻抗枝节的谐振器相比,图 3 所示的中心加载阶跃阻抗枝节的谐振器实现了两个偶模位置的单独调控,具有很好的带宽设计灵活性,理论上在此基础上设计滤波器可以获得任意相对带宽,同时阻抗枝节的长度也变短,使滤波器尺寸更加紧凑。



(a) 枝节低阻抗部分水平宽度 W_3 对谐振频率的影响 ($h_2 = 2 \text{ mm}$)



(b) 枝节低阻抗部分垂直长度 h_2 对谐振频率的影响 ($W_3 = 2 \text{ mm}$)

图 3 中心加载阶跃阻抗枝节的三模谐振器

3 超宽带滤波器的设计

3.1 基于中心加载阶跃阻抗枝节的三模谐振器的超宽带滤波器设计

基于第 2 节所做的分析,通过利用近似式(1)~(3)和电磁仿真软件,对图 1(b)所示中心加载阶跃阻抗枝节三模谐振器的结构参数进行微调,使得 3 个谐振频率尽量均匀分布在所需通带内(即 $3.1 \sim 10.6 \text{ GHz}$)。首先,用式(1)计算出 f_{odd} 选在 6.85 GHz (6.85 GHz 为带宽为 $3.1 \sim 10.6 \text{ GHz}$ 下的中心频点)时半波长谐振器 L 的长度,再结合式(2)和枝节低阻抗部分结构参数 W_3 和 h_2 对两个偶模的影响趋势将 $f_{\text{even}1}$ 和 $f_{\text{even}2}$ 调整值对称分布在中心频率两侧。为了尽量准确调整 3 个模式的谐振频率,上述计算调整过程都是在馈线与谐振器之间弱耦合设定条件下进行的。

最终将 3 个谐振模式选定为 $f_{\text{odd}} = 6.85 \text{ GHz}$, $f_{\text{even}1} = 4.26 \text{ GHz}$, $f_{\text{even}2} = 9.5 \text{ GHz}$ 。在此基础上加入传统平行耦合馈电,并在平行耦合线下方相应地板位置开槽,以增加馈线与谐振器之间的耦合强度^[13],得到的滤波器结构如图 4 所示(图中虚线矩形表示相应位置上的地板开槽)。其中 $W_1 = 0.2 \text{ mm}$, $W_2 = 0.4 \text{ mm}$, $W_3 = 0.9 \text{ mm}$, $W_4 = 0.2 \text{ mm}$, $W_5 = 1 \text{ mm}$, $L_1 = 8.9 \text{ mm}$, $L_2 = 4 \text{ mm}$, $h_1 = 6.7 \text{ mm}$, $h_2 = 1 \text{ mm}$, $g_1 = 0.1 \text{ mm}$ 。由 HFSS 计算得到的该滤波器在 $0 \sim 20 \text{ GHz}$ 频率范围内的频响特性如图 5 所示。可以看到该滤波器的 3 dB 通带带宽在 $4.00 \sim 9.85 \text{ GHz}$,带内插入损耗小于 0.3 dB ,反射损耗在 20 dB 左右,通带两侧均有一个传输零点,结果表明使用单独一个的中心加载阶跃阻抗枝节的三模谐振器即可实现宽通带、低插损、高频率选择性的通带性能良好的超宽带滤波器,降低了超宽带滤波器的结构复杂度和尺寸,且使用的三模谐振器的谐振频率都有相应的计算近似公式,结合电磁仿真软件上仿真得到的两个偶模谐振点随阶跃阻抗枝节尺寸变化的规律,设计宽带滤波器通带位置和带宽时的准确性和灵活性得到了提高。但 14.5 GHz 附近存在一个高次谐波

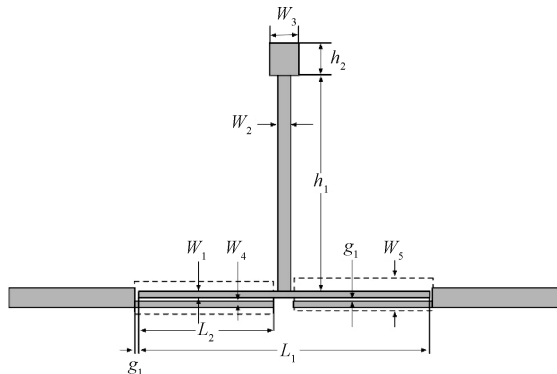


图 4 基于中心加载阶跃阻抗枝节三模谐振器的超宽带滤波器结构

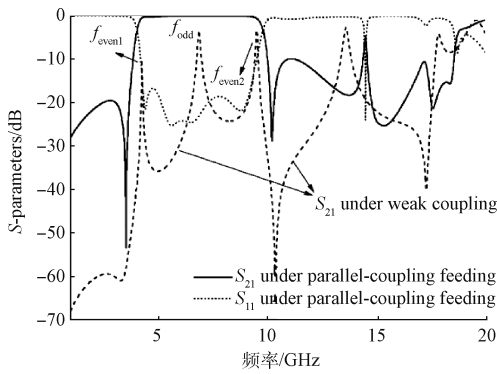


图5 基于中心加载阶跃阻抗枝节三模谐振器的超宽带滤波器的频率响应特性

(大约中心频率两倍处),导致 FCC 要求的室内超宽带通信 10 dB 阻带不到 15 GHz。

3.2 带有单极点低通特性的哑铃型缺陷地结构

为了进一步改善上述 UWB BPF 的上阻带特性,本设计引入一种新型哑铃型缺陷地低通结构。缺陷地结构由缺陷微带线演变而来,不但弥补了缺陷地波泄漏的不足,而且还易于和微波电路集成^[14]。利用缺陷地结构的单极点低通特性,可以对微带高次谐波进行有效抑制。本设计将传统哑铃型缺陷地的中心槽线的位置调整至两侧可以获得更小的带内反射损耗并减小整体尺寸,结构如图 6 所示(图中虚线表示在相应位置处的接地金属板上开槽)。

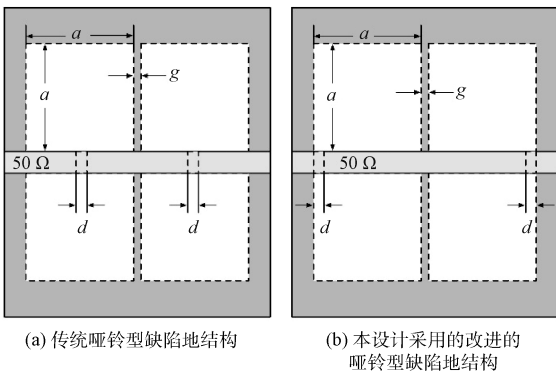


图6 两个级联的哑铃型缺陷地结构

单个哑铃型缺陷地结构的等效电路为一阶切比雪夫低通滤波器^[12],通过改变两个矩形(为了减少尺寸参数变量,本设计采用正方形哑铃缺陷地结构)缺陷面积的尺寸,即等效并联谐振电路中的电感值,就可以方便的移动该并联谐振点(即传输零点)位置。本设计将两个改进的哑铃型缺陷地级联,可以获得 3 阶低通滤波器特性,实现更高的阻带抑制和更陡峭的阻带边缘。在仿真软件 HFSS 中得到的该缺陷地结构的频率响应随尺寸 a 的变化趋势如图 7 所示。可看出当减小方形缺陷面积的时候,传输零点将向上频段移动,这也符合在并联谐振电路中减小等效电感值谐振频率将会

变大的原理。

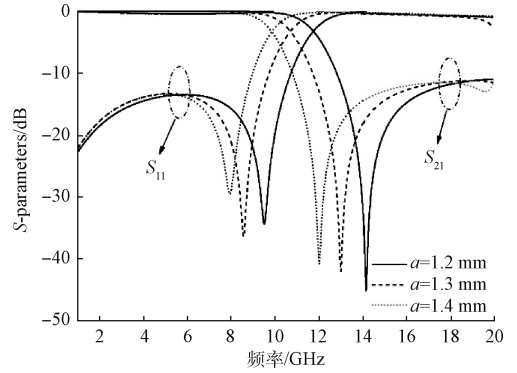


图7 两个级联的改进的哑铃型缺陷地结构的频率响应($d=0.2\text{ mm}$, $g=0.5\text{ mm}$)

3.3 加入改进的哑铃型缺陷地结构改善阻带特性的超宽带滤波器设计

把上述两个级联的改进哑铃型缺陷地结构加入 3.1 节中提出的超宽带滤波器中,并将平行耦合馈电方式改为能够提供更强耦合的交叉指型馈电方式,以改善加入低通缺陷地结构以后对 UWB BPF 通带性能的影响。加上缺陷地结构和交叉指型馈电以后的超宽带滤波器结构在图 8 中给出,同样在交叉指型耦合线下方相应接地板位置开槽,图中虚线所画结构为地板面上的开槽。

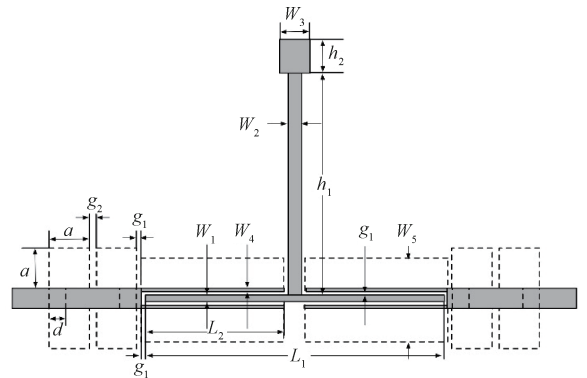


图8 采用改进的哑铃型缺陷地结构改善上阻带抑制特性的超宽带滤波器结构

仿真实验结果表明采用改进的哑铃型缺陷地结构能够有效抑制超宽带滤波器的高次谐波的影响。最终设计得到的该滤波器的结构参数为 $W_1=0.2\text{ mm}$, $W_2=0.4\text{ mm}$, $W_3=0.9\text{ mm}$, $W_4=0.1\text{ mm}$, $W_5=2.7\text{ mm}$, $L_1=8.9\text{ mm}$, $L_2=4\text{ mm}$, $h_1=6.7\text{ mm}$, $h_2=1\text{ mm}$, $g_1=0.1\text{ mm}$, $g_2=0.2\text{ mm}$, $a=1.2\text{ mm}$, $d=0.5\text{ mm}$ 。在上述参数下,利用 HFSS 计算滤波器的频率特性时,包括了电路导体损耗(利用铜的导电率 $5.8\times 10^8\text{ S/m}$),介质基板损耗(利用介质损耗正切角 0.003)和辐射损耗(滤波器置于无屏障空间),获得的超宽带滤波器的频率响应如图 9 所

示。可以看到 FCC 要求的 10 dB 阻带延伸至 30 GHz 以上,同时具有较好的通带性能:3 dB 相对带宽达到 80% (4.06~9.48 GHz),带内插入损耗小于 0.58 dB,回波损耗大 24 dB,且通带两侧均有一个传输零点,矩形系数较高,满足了 FCC 规定下的室内超宽带通信频谱特性使用要求。可见,使用中心加载阶跃阻抗枝节的三模谐振器设计超宽带滤波器,不仅结构紧凑、尺寸较小,且通过计算谐振器谐振点公式和调节阶跃阻抗枝节结构参数,可以将滤波器通带准确放置在所需频段内(理论上可获得任意中心频点位置和相对带宽,本设计要求是满足 FCC 室内超宽带通信要求的在 3.1 和 10.6 GHz 处阻带衰减达 10 dB 以上),再加入低通特性元件抑制高次谐波即可获得较完美的超宽带带通滤波器特性。

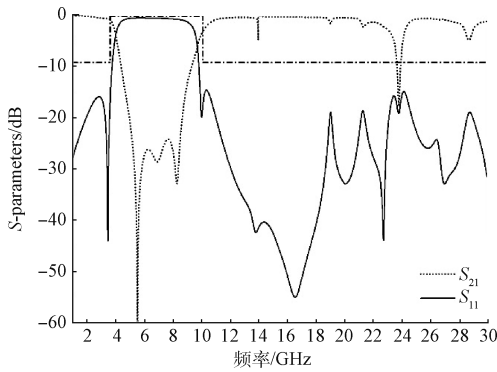


图 9 采用改进的哑铃型缺陷地结构改善上阻带抑制的超宽带滤波器的频率响应

4 结 论

本文提出了一种基于中心枝节加载微带三模谐振器的超宽带滤波器设计,将中心枝节的均匀阻抗改变为阶跃阻抗结构能够灵活控制滤波器带宽,此外还使用了一种改进的哑铃型缺陷地结构来抑制谐波影响,改善滤波器上阻带特性。仿真结果表明,所设计的超宽带滤波器具有约 80% 的 3 dB 相对带宽,通带内插损小,同时还具有陡峭的通带边缘和极宽的 10 dB 阻带,较好地满足了 FCC 规定的室内超宽带频谱使用要求。此外该滤波器尺寸小,结构简单,加工方便,具有较高的实用价值。然而该阶跃阻抗枝节加载谐振器对滤波器带宽设计准确性和灵活度的改进仅结合其频率响应的仿真结果进行了归纳,仍有进一步的发展空间,未来工作可以在解析得到阶跃阻抗枝节阻抗比对谐振点影响的关系中展开,获得更加精准的谐振点计算公式,从而减少超宽带滤波器设计工作的冗余度。

参考文献

[1] HONG J S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications [M]. Newyork: John Wiley &

Sons, 2011.

- [2] SARKAR P, GHATAK R, PAL M, et al. Compact UWB bandpass filter with dual notch bands using open circuited stubs [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22 (9): 453-455.
- [3] GHAZALI AN, SINGH A. Broadside coupled UWB filter with dual notched band and extended upper stopband [C]. International Conference on Devices, Circuits and Communications (ICDCCom), IEEE, 2014:1-5.
- [4] MOHAMMADI B, VALIZADE A, REZAEI P, et al. New design of compact dual band-notch ultra-wideband bandpass filter based on coupled wave canceller inverted T-shaped stubs [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2014, 9(1):64-72.
- [5] ZHU L, SUN S, MENZEL W. Ultra-wideband (UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2005, 15(11):796-798.
- [6] MA Z, HE W, CHEN C P, et al. A novel compact ultra-wideband bandpass filter using microstrip stub-loaded dual-mode resonator doublets [C]. International Microwave Symposium Digest, IEEE, 2008: 435-438.
- [7] ISHII H, KIMURA T, KOBAYASHI N, et al. Development of UWB HTS bandpass filters with microstrip stubs-loaded three-mode resonator [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 1500204-1500204.
- [8] SARKAR P, GHATAK R, PAL M, et al. High-selective compact UWB bandpass filter with dual notch bands [J]. Microwave & Wireless Components Letters IEEE, 2014, 24(7):448-450.
- [9] TIAN X K, CHU Q X, ZHU H, et al. A UWB bandpass filter with wide stopband performance using cross-shaped coupled lines [C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2012:1-4.
- [10] ZHANG X Y, CHEN J X, XUE Q, et al. Dual-band bandpass filters using stub-loaded resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(8): 583-585.
- [11] KOU J T, TANG S C, LIN S H. Quasi-elliptic function bandpass filter with upper stopband extension and high rejection level using cross-coupled stepped-impedance resonators [J]. Progress in

- Electromagnetics Research, 2011, 114(1): 395-405.
- [12] YANG D H, FU J S, CHENG J C, et al. Band rejection design for Chebyshev modulated dumbbell DGS low pass filters [C]. 4th International Nanoelectronics Conference (INEC), IEEE, 2011: 1-2.
- [13] WANG H, ZHU L. Aperture-backed microstrip line multiple-mode resonator for design a novel bandpass filter[C]. Asia-Pacific Microwave Conference, IEEE, 2005: 4.
- [14] 王燕燕, 姜毅, 李迎松. 基于缺陷微带线结构的三阻带滤波器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 645-652.

作者简介

何宇红, 2014年获上海大学工学学士学位, 现在上海大学通信与信息工程学院攻读电磁场与微波技术工学硕士学位, 主要研究方向为微波电路设计。

E-mail: 18801912513@163.com

马哲旺, 分别在1986年, 1989年获中国科学技术大学无线电电子学系学士和硕士学位, 1995年获日本国立电气通信大学博士学位, 主要研究方向为微波电路设计和计算电磁学。

杨雪霞, 2001年获上海大学博士学位, 现为上海大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为天线和计算电磁学。

(上接第142页)

- [10] 许东华, 林惠旺, 张兆华, 等. 压阻式压力传感器零点输出及其温漂研究[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(7): 188-191.
- [11] 王世清, 姜彤, 侯占民. 单晶硅压力传感器温度漂移的补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(7): 33-35, 39.
- [12] 何平, 潘国峰, 孙以材, 等. 压力传感器温度漂移补偿的RBF网络模型[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 572-576.

- [13] 胡园园, 李淮江, 王大军. 基于ATmega16的压力传感器温度补偿智能化设计[J]. 仪器仪表与传感器, 2010(10): 8-11.

作者简介

张艳华, 1984年出生, 硕士、工程师, 主要研究方向为压力传感器设计与测试技术等。

E-mail: zyhnew123008@163.com