

基于方开环谐振器的双陷波超宽带滤波器

王斌,荆麟,黄文

(重庆邮电大学 光电工程学院,重庆 400065)

摘要:针对超宽带系统易受窄带信号干扰的问题,设计了一种可以抑制无线局域网(WLAN)和卫星通信信号干扰的双陷波超宽带通滤波器。该滤波器的主要谐振结构由T型枝节加载的多模谐振器组成,改进的T型枝节增加了两个传输零点,同时减小了滤波器尺寸;通过耦合方开环谐振器,实现了两个陷波特性和调节谐振器尺寸,可以得到所需的陷波频率。测试结果表明,该滤波器的尺寸仅 $16.7\text{ mm}\times 8.5\text{ mm}$,中心频率为 6.9 GHz ,通带为 $3.0\sim 10.8\text{ GHz}$,陷波中心频率在 5.8 GHz 和 8.04 GHz ,衰减最低点分别为 -27 dB 和 -18 dB ,仿真与测量结果有较好的一致性。

关键词:滤波器;超宽带;双陷波;方开环谐振器;小型化

中图分类号:TN713; TN015 **文献标识码:**A

Ultra-Wideband Filter With Dual Notch Bands Based on Open-Square-Loop Resonators

WANG Bin, JING Lin, HUANG Wen

(College of Electronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: As the ultra-wideband (UWB) system is easy to be interfered by narrow-band signals, this paper proposed an UWB bandpass filter for the suppression of interference from WLAN and satellite communication signals. The main resonator structure consisted of the multi-mode resonator (MMR) loaded with a T-shape stub. The improved T-shape stub increased two transmission zeros, and reduced the filter size. Two band-notched characteristics were achieved by coupling open-square-loop resonators. The desired notch frequencies could be obtained by adjusting the size of resonators. The measured results showed that the filter size was just $16.7\text{ mm}\times 8.5\text{ mm}$, and the center frequency is 6.9 GHz with the passband of 3.0 to 10.8 GHz . Two notch bands centered at 5.8 GHz and 8.04 GHz with the lowest attenuation point at -27 dB and -18 dB respectively. The measured results are in sound agreement with simulation results.

Key words: filter; ultra-wideband; dual notched bands; open-square-loop resonators; miniaturization

0 引言

超宽带(UWB)无线通信系统具有传输速率快,发射信号功率低和抗干扰能力强等优点^[1]。超宽带滤波器是超宽带通信系统的核心部件之一,其设计受到了越来越多的关注^[2-3]。然而,在多种通信系统并存的情况下,超宽带频段覆盖了其他无线网络通信频段,如 5.8 GHz 的无线局域网(WLAN)频段, 8.0 GHz 的卫星通信频段等^[4]。为了避免超宽带通带内其他信号的干扰,设计具有陷波功能的超宽带滤波器显得尤为重要。目前实现陷波的方法主要有加载开路枝节^[5-6],但其得到的陷波带宽较宽,

衰减减小;在接地板或微带线上耦合陷波谐振器^[7-8],但增加了带内插损。文献[9]通过加入折叠耦合臂和嵌入式开路枝节实现了双陷波特性和;文献[10-11]也提出了新型结构来实现陷波特性和。由此可见,小型化、高选择性,且具有良好陷波功能的超宽带滤波器设计是当前研究的热点与难点。

本文以小型化、高选择性为目标,设计了一款可以抑制WLAN和卫星通信信号干扰的双陷波超宽带滤波器。通过T型枝节加载的多模谐振器(MMR)和交指型耦合线组成了超宽带滤波器的基本结构,改进的T型枝节增加了上、下阻带的传输

收稿日期:2016-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401054)

作者简介:王斌(1982-),男,重庆人,副教授,博士,主要从事射频微波电路及毫米波技术的研究。E-mail: wangbin1@cqupt.edu.cn.

零点,使带外衰减更陡峭;在交指型馈线上耦合的两个对称的方开环谐振器,实现了 5.8 GHz 和 8.04 GHz 的陷波特性和。

1 滤波器设计

1.1 超宽带滤波器的设计

文献[12]提出了一种新型枝节加载阶跃阻抗谐振器设计的超宽带滤波器,通过加载枝节,引入传输零点,提高了通带选择性。本文基于该滤波器进行了改进和优化。

图 1 为改进后的超宽带滤波器结构示意图。该滤波器由 T 型枝节加载的 MMR 和交指耦合线构成,在交指耦合线的背面刻蚀了两个矩形的缺陷地结构(DGS),其作用是增强 MMR 与交指型馈线的耦合。MMR 上加载的 T 型枝节在通带两侧各增加了一个谐振模式,从而提高了通带的频率选择性。整个器件尺寸与文献[12]相比减小了 50%。

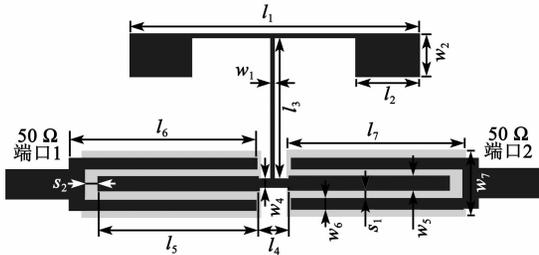


图 1 超宽带滤波器结构

图 2 是在输入、输出为弱耦合 ($l_6 = 0.5 \text{ mm}$) 时,改变 T 型枝节的长度 l_1 对谐振器的谐振频率和传输零点的影响。没有 T 型枝节时,MMR 只有 3 个谐振模式 (f_2, f_3, f_4)。在谐振器中间并联 T 型枝节后,谐振模式由 3 个增加到 5 个,即在通带的两边各增加了一个偶模谐振模式 (f_1, f_5)。由图 2 可看出, l_1 由 11.5 mm 增加到 13.6 mm 时,仅 f_1 和 f_5 发生了变化。通过调节 MMR 和 T 型枝节的尺寸,可使 5 个谐振模式合理分布在超宽带通带内。

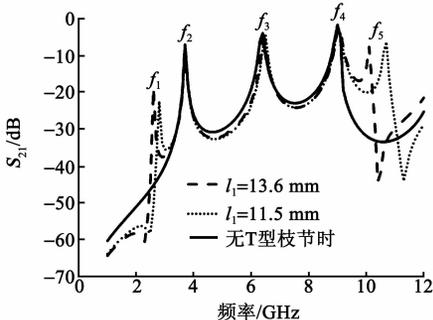


图 2 T 型枝节对谐振模式的影响

1.2 双陷波超宽带滤波器的设计

本文改进了一种方开环谐振器,通过将其与滤

波器的交指型馈线相耦合,设计了一款具有双陷波特性的超宽带滤波器,其结构如图 3 所示。方开环谐振器位于 T 型枝节两侧,且与交指型馈线相距很近,产生强耦合,实现陷波特性和。

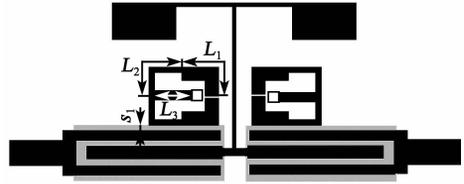


图 3 具有陷波功能的超宽带滤波器结构

方开环谐振器的结构如图 4(a) 所示。Y 为枝节的特性导纳, θ 为枝节的电长度,外环结构由 $\lambda_g/2$ (λ_g 为微带中的介质波长) 型阶跃阻抗谐振器 (SIR) 组成,在外环的中间位置处加载了长度为 L_3 ,特性导纳为 Y_3 的短路枝节。整个谐振器结构对称,可以采用奇偶模等效法分析其谐振特性。

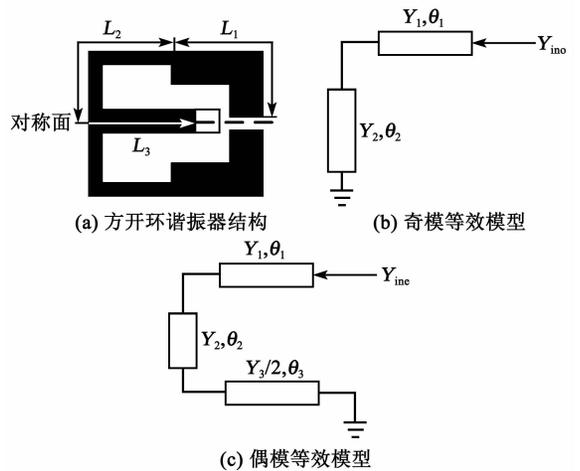


图 4 方开环谐振器结构及其等效电路模型

奇模激励时,对称面处虚拟短路,可忽略加载的短路枝节,奇模等效模型如图 4(b) 所示。奇模输入导纳为

$$Y_{ino} = -jY_1 \frac{Y_2 \cot \theta_2 - Y_1 \tan \theta_1}{Y_1 + Y_2 \cot \theta_2 \tan \theta_1} \quad (1)$$

式中: $\theta_1 = \beta L_1$; $\theta_2 = \beta L_2$ 。根据谐振条件 $I_m(Y_{ino}) = 0$, 可得

$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 = k \quad (2)$$

式中 $k = Y_2 / Y_1$ 为导纳比。

谐振器外环 SIR 的总电长度为

$$\theta_T = \theta_1 + \theta_2 = \theta_1 + \tan^{-1} \left(\frac{k}{\tan \theta_1} \right) \quad (3)$$

当 $k < 1, 0 < \theta_1 < \pi/2$ 时, θ_T 有极小值。令 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, 代入式(2), 可得

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{k} \quad (4)$$

把 $\theta = 2\pi L f_0 \sqrt{\epsilon_e}/c$ 代入式(4),得到奇模谐振频率为

$$f_{\text{odd}}(f_n^h) = \frac{\tan^{-1} \sqrt{k} \cdot c}{2\pi L_1 \sqrt{\epsilon_e}} \quad (5)$$

$$Y_{\text{ine}} = \frac{Y_3 \cot \theta_3 (Y_2 - Y_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2) + 2Y_2 (Y_2 \tan \theta_2 + Y_1 \tan \theta_1)}{2Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 \tan \theta_2 \cot \theta_3 - 2Y_2^2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 + Y_2 Y_3 \tan \theta_1 \cot \theta_3} \quad (6)$$

为了简化计算,令 $\theta_1 = \theta_2 = \theta, Y_3 = Y_1$,根据谐振条件 $I_m(Y_{\text{ine}}) = 0$,可得

$$\tan(\theta + \theta_3) \tan \theta = k \quad (7)$$

因为 $\theta_3 \geq 0$,所以,偶模谐振频率小于奇模谐振频率,偶模谐振频率为

$$f_{\text{even}}(f_n^l) = \frac{c}{4(2L_1 + L_3) \sqrt{\epsilon_e}} < f_{\text{odd}} \quad (8)$$

当方开环谐振器中 L_1 的值确定后,偶模谐振频率只与短路枝节的尺寸(L_3)有关。改变短路枝节的长度 L_3 ,可得到所需的谐振频率(陷波频率)。然而,短路枝节的长度变化是有限的,当 $L_3 > \lambda_{g,\text{even}}/4$ 时($\lambda_{g,\text{even}}$ 为偶模谐振波长),由式(8)可得 $f_{e1} < f_{\text{odd}}$ (f_{e1} 为偶模谐振的一次谐波频率),不满足设计要求。因此, L_3 的约束条件如下:

$$0 \leq L_3 \leq \frac{\lambda_{g,\text{even}}}{4} \quad (9)$$

把式(9)代入式(7),得到 f_{even} 的变化范围为

$$\frac{f_{\text{odd}}}{2} \leq f_{\text{even}} \leq f_{\text{odd}} \quad (10)$$

为了实现滤波器在 5.8 GHz (WLAN) 和 8.0 GHz (卫星通信信号) 的陷波特性和,设定 $f_{\text{odd}} = 8.0$ GHz, $f_{\text{even}} = 5.8$ GHz。由式(10)可看出,该理论分析满足设计要求。

2 滤波器的仿真与测试

本文选用厚为 0.508 mm 的 Rogers RT/duroid 5880 (tm) 介质板(相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$),利用高频仿真软件 HFSS 对提出的超宽带滤波器进行建模仿真。取 $l_6 = 8.1$ mm (即 $\lambda_0/4$, λ_0 为 $f_0 = 6.85$ GHz 对应波长),与 MMR 构成强耦合。为了获得陡峭的阻带衰减,使两个传输零点分别靠近两端的截止频率,取 $l_1 = 14.2$ mm。确定滤波器的其他参数为: $w_1 = 0.1$ mm, $l_2 = 3.1$ mm, $w_2 = 1.5$ mm, $l_3 = 7.4$ mm, $w_3 = 0.2$ mm, $l_4 = 1.0$ mm, $w_4 = 0.36$ mm, $l_5 = 8.0$ mm, $w_5 = 0.52$ mm, $w_6 = 0.41$ mm, $l_7 = 8.1$ mm, $w_7 = 2.1$ mm, $s_2 = 0.18$ mm, $s_1 = 0.18$ mm。

式中: c 为真空中的光速; ϵ_e 为介质基板有效介电常数。由此可看出,奇模谐振频率只与 L_1 和 k 有关。

偶模激励时,对称面处虚拟开路,加载的短路枝节沿着对称面等分,偶模等效模型如图 4(c) 所示。偶模输入导纳为

图 5 为超宽带滤波器的 S 参数仿真结果。由图可见,改进的超宽带滤波器具有良好的通带特性和陡峭的带外衰减,3 dB 带宽为 3.0~10.8 GHz,插入损耗小于 0.5 dB,阻带衰减大于 20 dB,在 2.4 GHz 和 11.5 GHz 处各有一个传输零点,提高了滤波器的频率选择性。

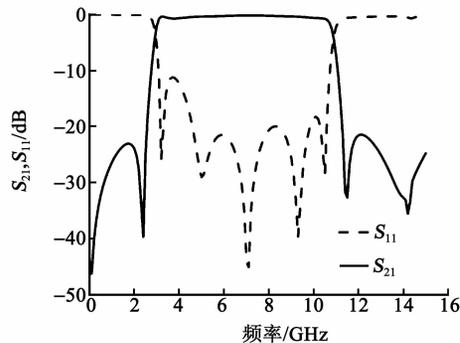


图 5 UWB 滤波器 S 参数仿真结果

为了有效抑制超宽带通带内 WLAN 和卫星通信信号的干扰,根据前文的分析,本文选择导纳比 $k = 0.65$ 。首先设定方开环谐振器外环 SIR 的尺寸,使 f_{odd} (高的陷波频率) 为 8.0 GHz; 然后,优化短路枝节 L_3 的长度,使 f_{even} (低的陷波频率) 为 5.8 GHz。图 6 为陷波频点随 L_1 的变化情况。由图可见,随着 L_1 改变,两个陷波频率都发生了变化,由于高的陷波频率主要由 L_1 确定,故 L_1 的变化对高的陷波频率影响更大。

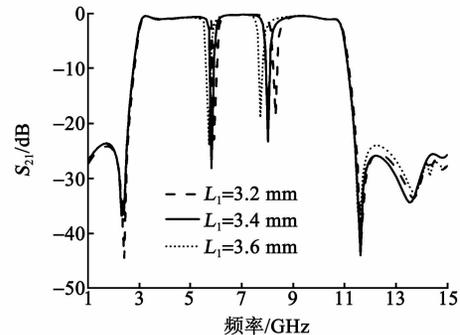


图 6 陷波频点随 L_1 长度的变化情况

图 7 为陷波频点随 L_3 的变化情况。由图可见,当 L_3 由 1.43 mm 增加到 1.83 mm 时,低的陷波频

率由 5.9 GHz 降到 5.6 GHz,而高的陷波频点稳定在 8.0 GHz。加入陷波结构后,除陷波带外,滤波器的带内特性并没有恶化,最终取 $L_3 = 1.63$ mm,确定其他参数如下: $s_1 = 0.19$ mm, $L_1 = L_2 = 3.2$ mm。

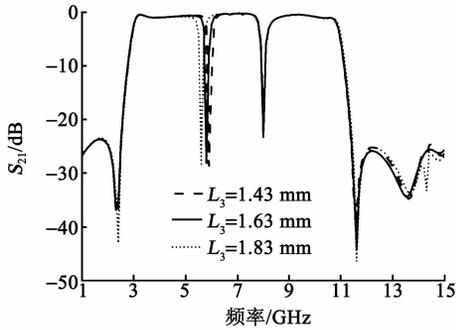


图 7 陷波频点随 L_3 长度的变化情况

本文对设计的超宽带滤波器进行了实物加工,实物图如图 8 所示。滤波器的整体尺寸仅为 16.7 mm \times 8.5 mm。采用安捷伦矢量网络分析仪 N5242A 对其进行测试。图 9 为仿真结果与实测结果的对比图。由图 9 可见,超宽带滤波器的 3 dB 带宽为 3.0~10.8 GHz,带内最大插损为 1.2 dB,阻带衰减在 17 GHz 内大于 15 dB。第 1 个陷波带的中心频率在 5.8 GHz,衰减最低点达到 -27.49 dB,陷波相对带宽为 5.8%;第 2 个陷波带的中心频率在 8.04 GHz,衰减最低点在 -18.83 dB,陷波相对带宽仅 4.3%。测试结果与仿真结果基本一致,产生的误差可能主要由加工精度的局限性,介质材料的误差以及焊接射频同轴连接器(SMA)接头的寄生效应等引起。

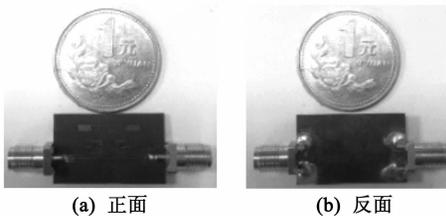


图 8 超宽带滤波器实物图

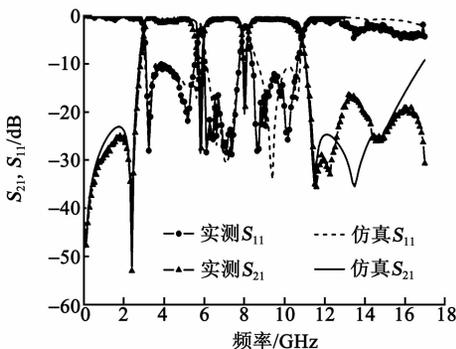


图 9 仿真结果与实测结果

表 1 对比了本文设计的滤波器与参考文献中滤波器的关键指标。由表可看出,本文设计的滤波器具有小型化的优势和较好的陷波特性和上、下阻带的传输零点使其具有更陡峭的带外衰减和更好的频率选择性。

表 1 本文滤波器与其他滤波器的参数对比

参考文献	尺寸/mm	传输零点:上阻带/下阻带	陷波频点/GHz	衰减/dB
[4]	34.6 \times 12.7	无/有	5.8,8.0	<-15
[7]	11.25 \times 4.8	有/有	5.13,8.0	<-13
[8]	31.2 \times 11.4	有/有	5.8,8.0	<-30
[9]	30 \times 16	无/有	5.3,7.8	<-20
[10]	24.7 \times 12	无/有	5.9,8.0	<-17
[11]	22 \times 10	无/无	5.75,8.05	<-20
本文	16.7 \times 8.5	有/有	5.8,8.0	<-18

3 结束语

本文采用在交指型馈线上耦合对称的方开环谐振器,设计了一款可以抑制 WLAN 和卫星通信信号干扰的双陷波超宽带带通滤波器。通过奇偶模分析法与模拟仿真,详细讨论了耦合的方开环谐振器对陷波特性的影响。仿真与测试结果表明,耦合结构的加入,未增加滤波器的尺寸,也未改变除陷波频带外的滤波器的通带特性,该滤波器在 3.0~10.8 GHz 内产生了两个带宽较窄、衰减较大的陷波频带,陷波中心频率分别为 5.8 GHz 和 8.04 GHz,测试结果与仿真结果有较好的一致性,验证了理论的正确性。本文设计的超宽带滤波器结构紧凑,频率选择性好,具有一定的实用价值和应用前景。

参考文献:

[1] 张友俊,秦家峰.一种中心枝节折叠的新型超宽带滤波器[J]. 压电与声光,2014,36(5):720-722.
ZHANG Youjun, QIN Jiafeng. A novel ultra-wideband filter with the center-minor folded[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36 (5): 720-722.

[2] 王章静.基于平行耦合微带线和 DGS 结构的超宽带滤波器[J]. 压电与声光,2013,35(2):276-278.
WANG Zhangjing. Ultra-wideband bandpass filter based on parallel-coupled microstrip lines and defected ground structure[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(2): 276-278.

[3] 汪子成,杨涛,杨自强.基于 DGS 结构的超宽带带通滤波器[J]. 压电与声光,2014,36(6):952-954.