

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104870

# 采用阶梯 T 型谐振器的双陷波 UWB 滤波器\*

高明明<sup>1,2</sup> 张雪曼<sup>1</sup> 南敬昌<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105; 2. 大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

**摘要:**为有效抑制印度国家卫星通信 C 频段和 X 卫星频段对超宽带通信系统的干扰,提出了一种新型双陷波超宽带滤波器。该滤波器采用阶梯 T 型多模谐振器(multimode resonator, MMR)与缺陷地结构(defected ground structure, DGS)的交趾耦合,实现超宽带特性。采用非对称耦合线及在 MMR 两侧耦合分裂环谐振器的方法,分别在 6.67~7.06 GHz, 7.47~7.57 GHz 两个频段内产生陷波。实测结果与仿真结果吻合较好,该滤波器的通带范围为 3.03~11.50 GHz, 3 dB 带宽达到 123%, 插入损耗仅有 0.87 dB, 两处陷波中心频率分别在 6.87 GHz 和 7.52 GHz, 陷波深度均大于 20 dB, 且整体尺寸紧凑, 仅有 16 mm×8 mm 大小。

**关键词:**超宽带; 陷波特性; 阶梯 T 型谐振器; SRR 谐振器; 缺陷地结构

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

## Double notch bands UWB filter using stepped T-shaped resonator

Gao Mingming<sup>1,2</sup> Zhang Xueman<sup>1</sup> Nan Jingchang<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to effectively suppress the interference of the C-band of the Indian National Satellite Communication and X-satellite frequency bands to the ultra-wideband communication system, a new type of dual notch bands UWB filter is proposed. The filter adopts the intersection with a stepped T-type multimode resonator (MMR) and a defective ground structure (DGS) to achieve ultra-wideband characteristics. Using asymmetric coupling lines and coupling split ring resonators on both sides of the MMR, notches are generated in the two frequency bands of 6.67~7.06 GHz and 7.47~7.57 GHz respectively. The measured results are in good agreement with the simulation results. The passband range of the filter is 3.03~11.50 GHz, the 3 dB bandwidth reaches 123%, the insertion loss is only 0.87 dB, and the center frequencies of the two notches are at 6.87 GHz and 7.52 GHz, respectively. The depth of notch bands is greater than 20 dB, and the overall size is compact, only 16 mm×8 mm.

**Keywords:** ultra-wideband; notch characteristics; stepped T-type resonator; SRR resonator; defected ground structure

## 0 引言

自从 2002 年美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)批准将 3.1~10.6 GHz 频段用于商业通信以来,超宽带(Ultra-wideband, UWB)技术产品迎来了飞速发展<sup>[1-3]</sup>。滤波器作为超宽带通信系统中必不可少的组成之一,设计滤波效果良好的滤波

器也显得至关重要。其中,具有尺寸小、选择性高、频带宽、性能稳定等特性成为判断优秀 UWB 滤波器设计的标准<sup>[4-7]</sup>。在近年来的发展中,设计超宽带通滤波器的方法被不断提出:级联低通/高通滤波器法、多模谐振器法、缺陷微带结构法、缺陷接地结构法、多层耦合结构法等都被广泛应用,以此来实现超宽带特性<sup>[8-11]</sup>。传统超宽带滤波器较多采用将低通/高通滤波器级联,但是设计尺寸大小与滤波器数量成正比,不易压缩,且不利于小型化发

收稿日期: 2021-11-03 Received Date: 2021-11-03

\* 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61701211)、国家自然科学基金(61971210)、北京市科技计划项目:基于硬件加速的三维重建体育展示平台(Z201100005820010)、辽宁工程技术大学横向课题:基于压缩感知的图像传输与重构技术研究(21-2067)项目资助

展趋势<sup>[12-13]</sup>。为解决传统超宽带设计缺陷,Zhu 等<sup>[14]</sup>在 2005 年首次提出使用多模谐振器法设计超宽带滤波器,该方法是通过调谐带内谐振点的分布获得良好的通带特性。

文献[15]提出了一种基于三角环多模加载谐振器,通过非对称耦合输入输出馈线得到两个传输零点,完成超宽带滤波器的设计,虽然达到设计超宽带的带宽,但其宽带范围还有待增加。由于 FCC 所规定的超宽带(UWB)频段范围包含了一些已被当代无线通信系统占用的频段,包括印度国家卫星通信 C 频段(6.7~7.1 GHz)和 X 卫星(下行:7.25~7.75 GHz)等<sup>[16]</sup>,因此具有陷波特性的超宽带滤波器迅速成为了研究热点。为抑制窄带系统的影响,单陷波及多陷波 UWB 滤波器的设计方法被不断提出<sup>[17-19]</sup>。文献[17]提出使用微带-槽线过渡结构与槽线上的短路 MMR 实现耦合形成超宽带,并通过耦合一对分裂环谐振器(split ring resonator, SRR)结构引入单陷波,但其陷波个数较少,无法抑制过多的窄带干扰信号。文献[18]提出使用两个 MMR 设计滤波器,通过将两个不同的谐振器耦合实现超宽带特性,并调节谐振器枝节长度及与馈线耦合距离,产生三陷波。由于谐振器数量增多,设计尺寸成正比增长,不符合小型化的设计要求。文献[19]提出了加载非对称三段阶梯阻抗谐振器实现超宽带,在输入输出端口耦合两个半波长分型希尔伯特谐振器,实现在 5.1、5.9 GHz 的双陷波,但其插入损耗较大且陷波深度不足。

根据以上的研究背景,本文提出了一种在水平传输线上加载阶梯 T 型谐振器设计的新型多模谐振器,通过与输入输出馈线的强耦合及缺陷地结构(DGS)实现频带为 3.03~11.5 GHz 的超宽带滤波器。通过非对称耦合线与新型谐振器的交趾耦合,得到了中心频率为 6.87 GHz 的陷波;在多模谐振器两侧耦合分裂环谐振器(SRR)的方式,得到了中心频率为 7.52 GHz 的陷波,分别有效抑制了印度国家卫星通信 C 频段(6.7~7.1 GHz)和 X 卫星频段(7.25~7.75 GHz)对超宽带系统的干扰。该双陷波滤波器不但体积小,仅有 16 mm×8 mm,且陷波深度足够深(均大于 21 dB),陷波带宽极窄,具有良好的滤波性能。

## 1 超宽带滤波器的设计

### 1.1 阶梯 T 型谐振器的设计和分析

本文基于多模谐振理论,提出了一种新型的多模谐振器,该谐振器是由传统 T 型谐振器演变得到。其演变过程如图 1 所示,其中,图 1(a)为传统 T 型谐振器;将 T 型谐振器中平行于水平传输线的均匀阻抗枝节(UIR)优化为  $\lambda_g/2$  型阶跃阻抗枝节(step-impedance resonator,

SIR),如图 1(b)所示;再对 SIR 枝节两侧高电阻部分进行挖槽处理,如图 1(c)所示;而后再将 T 型谐振器中垂直于水平传输线的均匀阻抗枝节(uniform-impedance resonator, UIR)改进为阶梯阻抗枝节,如图 1(d)所示。最后将演化后的阶梯 T 型谐振器加载在水平传输线上形成新型多模谐振器。

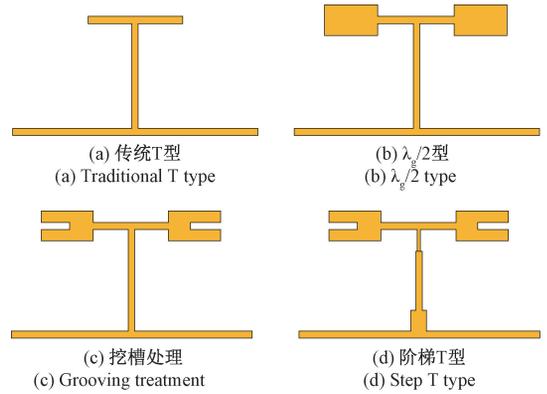


图 1 多模谐振器演变过程结构

Fig. 1 Structure diagram of the evolution process of the multimode resonator

由传输线阻抗变换理论可知,可将一定长度均匀的微带线等效为谐振器,其输入阻抗定义为:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \theta}{Z_0 + jZ_L \tan \theta} \quad (1)$$

式中:  $Z_0$ 、 $Z_L$  分别代表特征阻抗和负载阻抗。

该阶梯 T 型谐振器关于轴 T-T' 对称,可通过奇偶模分析法对其进行研究与分析。多模谐振器及其奇偶模等效结构分别如图 2(a)~(c)所示。水平传输线及阶梯 T 型谐振器各枝节的特性导纳、电长度、传输线长度分别由  $Y$ 、 $\theta$ 、 $L$  表示。 $Y_{in,odd}$ 、 $Y_{in,even}$  分别表示奇模、偶模输入导纳, $Y_{e1}$ 、 $Y_{e2}$ 、 $Y_{e3}$ 、 $Y_{e4}$ 、 $Y_{e5}$ 、 $Y_{e6}$  分别为各箭头所对应的输入导纳。

图 2(b)为谐振器在奇模激励时的等效结构,对称面 T-T' 呈短路状态,其奇模输入导纳表示为:

$$Y_{in,odd} = -jY_1 \cot \theta_1 \quad (2)$$

图 2(c)为偶模激励时的等效结构,此时对称面 T-T' 相当于开路,根据传输线理论,偶模输入导纳表示为:

$$Y_{in,even} = Y_1 \frac{Y_{e1} + jY_1 \tan \theta_1}{Y_1 + jY_{e1} \tan \theta_1} \quad (3)$$

其中:

$$Y_{e1} = Y_2 \frac{Y_{e2} + jY_2 \tan \theta_2}{Y_2 + jY_{e2} \tan \theta_2} \quad (4)$$

$$Y_{e2} = Y_3 \frac{Y_{e3} + jY_3 \tan \theta_3}{Y_3 + jY_{e3} \tan \theta_3} \quad (5)$$

$$Y_{e3} = Y_4 \frac{Y_{e4} + jY_4 \tan \theta_4}{Y_4 + jY_{e4} \tan \theta_4} \quad (6)$$

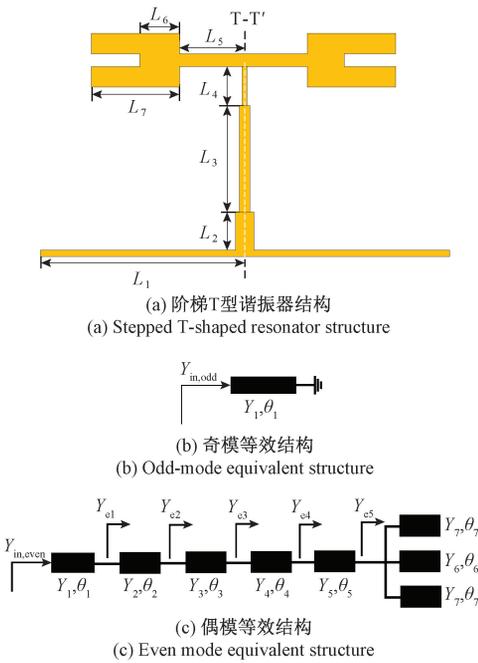


图2 多模谐振器及其奇偶模结构

Fig. 2 Multimode resonator and its odd and even mode structure

$$Y_{e4} = Y_5 \frac{jY_5 \tan \theta_5 + jY_6 \tan \theta_6 + 2jY_7 \tan \theta_7}{Y_5 + j(Y_6 \tan \theta_6 + 2Y_7 \tan \theta_7) \tan \theta_5} \quad (7)$$

根据谐振条件  $\text{Im}(Y_{in}) = 0$ , 可得当谐振时, 令式(1)和(3)中的  $Y_{in, odd} = Y_{in, even} = 0$ , 可得到: 奇模谐振频率满足  $\cot \theta_1 = 0$ , 显然在  $\theta_1 = (2n - 1)\pi/2$ , 其中  $n = 1, 2, 3, \dots$  时, 满足谐振条件。若令  $K_1 = Y_1/Y_2, K_2 = Y_2/Y_3, K_3 = Y_3/Y_4, K_4 = Y_4/Y_5$ , 且  $Y_5 = Y_6 = Y_7, \theta_5 = \theta_6 = \theta_7$ , 则偶模谐振频率经化简得到:

$$A + jK_2 \tan \theta_2 + jK_1 \tan \theta_1 (K_2 + jA \tan \theta_2) = 0 \quad (8)$$

其中:

$$A = \frac{B + jK_3 \tan \theta_3}{K_3 + jB \tan \theta_3} \quad (9)$$

$$B = Y_4 \frac{C + jK_4 \tan \theta_4}{K_4 + jC \tan \theta_4} \quad (10)$$

$$C = Y_5 \frac{j4 \tan \theta_5}{1 - 3(\tan \theta_5)^2} \quad (11)$$

式中:  $\theta_1 = \beta L_1, \theta_2 = \beta L_2, \theta_3 = \beta L_3, \theta_4 = \beta L_4, \theta_5 = \beta L_5, \beta$  为相位常数。

由式(1)~(11)可以获得该T型谐振器的3个谐振频率,  $f_0$  为奇模谐振频率,  $f_{e1}$  和  $f_{e2}$  分别为两个偶模谐振频率。由式(1)~(2)可知, 奇模的谐振频率主要由处于水平位置的传输线  $L_1$  的长度决定; 由式(3)~(11)可知, 偶模的谐振频率则由整个多模谐振器控制, 可通过调节谐振器的参数来控制谐振频率的范围, 使设计得到更宽的带宽。谐振器在弱耦合条件下, 利用仿真软件

HFSS15.0 进行仿真, 即可观察到谐振点。通过改变T型谐振器各枝节的长度, 3个谐振点在不断变化, 按照前文提出的阶梯T型谐振器的演变过程, 分别对演化过程中的4种MMR进行仿真, 得到谐振点的变化规律, 如图3所示。从图中观察到, 随着MMR图形结构从简单变到复杂,  $f_{e1}$  和  $f_{e2}$  均向低频方向移动, 但  $f_{e2}$  的变化范围明显小于  $f_{e1}$ , 即谐振器在处于MMR4状态时两个谐振点跨距的范围更大, 可保证在强耦合状态下带宽是逐渐增加的。在演化过程中, 没有改变水平传输线(即  $L_1$ ) 的长度, 因此奇模谐振频率  $f_0$  也没有发生明显变化。

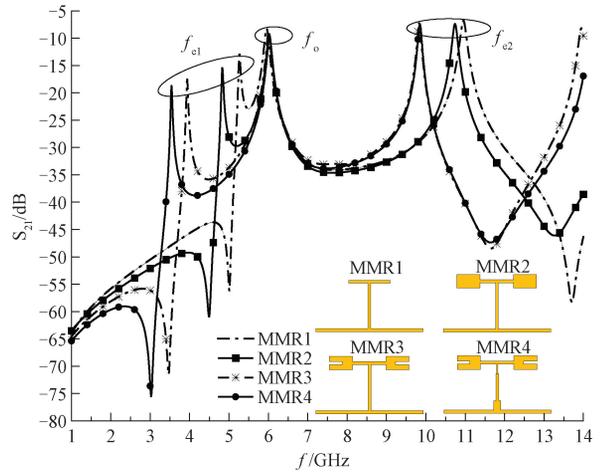


图3 4种MMR在弱耦合下的曲线

Fig. 3 Curves of four types of MMR under weak coupling

综上所述, 根据超宽带范围更宽以及带外抑制能力更强的原则, 最终选择MMR4作为新型多模谐振器。并用该谐振器与输入输出馈线进行交趾耦合, 形成超宽带微带滤波器。

### 1.2 超宽带滤波器的设计和分析

该滤波器的整体结构如图4所示。图中灰色阴影为地板的开槽部分, 其位置在输入输出耦合线的正下方, 用于增强输入和输出端的耦合, 使得到超宽带的带宽更宽。

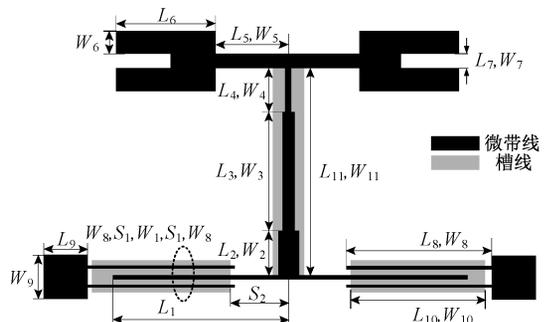


图4 超宽带滤波器的结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of an ultra-wideband filter

图 3 中看出,在弱耦合条件下使带宽最大的谐振器为 MMR4(即阶梯 T 型谐振器),将其与输入输出馈线进行强耦合,再对地板进行开槽,最终将弱耦合情况、强耦合情况(无槽)与有槽 3 种滤波器进行仿真对比,其波形如图 5 所示。从图中能明显看出,有槽时的滤波器带宽比无槽时宽 0.6 GHz,可通过调整槽  $L_{10}$ 、 $W_{10}$  及  $L_{11}$ 、 $W_{11}$  大小,将带宽范围最大化。

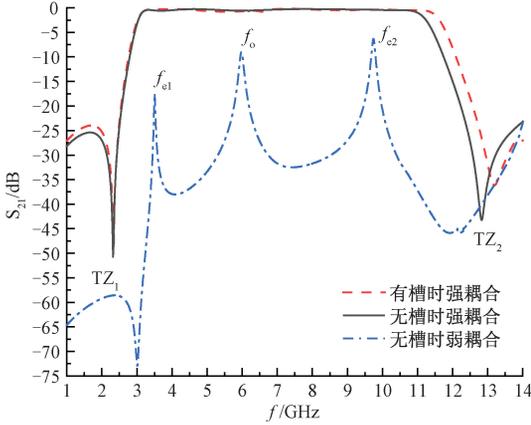


图 5 强弱耦合及有无槽对比

Fig. 5 Comparison of strong and weak coupling and with or without slots

图 6 为优化后的滤波器 S 参数仿真曲线。该滤波器的 3 dB 带宽为 2.99~11.38 GHz,中心频率为 6.85 GHz 时的相对带宽达到 122.48%,通带内平坦,带内最小插损仅为 0.6 dB,回波损耗大于 11 dB。在 2.32,12.83 GHz 处衰减分别达到 50.73,43.23 dB,有良好的带外抑制能力。经过不断调试及优化,最终得到超宽带滤波器的尺寸大小,如表 1 所示。

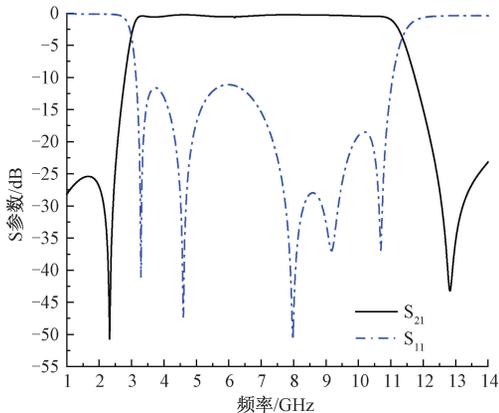


图 6 超宽带滤波器仿真结果

Fig. 6 Simulation results of ultra-wideband filter

表 1 超宽带滤波器结构的参数

Table 1 Parameters of UWB filter structure

变量	数值/mm	变量	数值/mm	变量	数值/mm
$W_1$	0.15	$W_5$	0.4	$W_9$	1.4
$L_1$	6	$L_5$	0.92	$L_9$	1.6
$W_2$	0.48	$W_6$	0.6	$W_{10}$	0.9
$L_2$	1.4	$L_6$	3.1	$L_{10}$	5.2
$W_3$	0.3	$W_7$	0.4	$W_{11}$	0.68
$L_3$	3.2	$L_7$	2	$L_{11}$	5.6
$W_4$	0.2	$W_8$	0.1	$S_1$	0.1
$L_4$	1	$L_8$	5.5	$S_2$	3.65

## 2 具有双陷波特性的滤波器设计

### 2.1 陷波特性和分析

由于超宽带 (3.1~10.6 GHz) 系统包含了范围较大的带宽,其中也包含了许多其他通信系统,比如印度国家卫星通信 C 频段 (6.7~7.1 GHz) 和 X 卫星频段 (7.25~7.75 GHz),为了避免这些系统在工作时对 UWB 系统产生干扰,因此引入具有陷波特性的超宽带滤波器成为当务之急。同时,具有陷波特性的 UWB 滤波器也追求小型化设计要求,本文通过非对称耦合线和在谐振器旁边两侧加载一对 SRR 谐振器,在没有增加设计尺寸的基础上引入了两个陷波,在保证结构紧凑的同时满足了小型化的需求。其具体结构如图 7 所示。

引入第 1 个陷波采用非对称耦合线法,其结构如图 7 右侧放大图所示。此结构是将上方馈线延长并进行弯折,形成 U 字型,U 字型底长  $L_{12}$ ,高  $L_{13}$ ;下方馈线向内缩减长度为  $L_{14}$ 。通过改变 U 字型的高  $L_{13}$ ,可对第一个陷波的位置和深度进行调整。图 8 上侧是 U 字型高  $L_{13}$  分别取值为 0.4、1.6、2.8 mm 时,通过仿真得到的陷波频率变化曲线。可观察到随着  $L_{13}$  长度的增加,只有第 1 个陷波的中心频率左移,且陷波深度不断增加,而第 2 个陷波的中心频率及深度几乎不变。因此可通过调节  $L_{13}$  的长度,使陷波频率位于 6.7~7.1 GHz 区间内,综合考虑,选择  $L_{13}=1.6$  mm。图 8 下侧是陷波中心频率为 6.87 GHz 时,该结构表面的电流分布情况。非对称枝节区域电流分布密集,其余区域的电流分布稀疏。当陷波中心频率位于 6.87 GHz 处,电流集中分布在非对称枝节,能量被封闭该结构中,实现陷波特性和对印度卫星通信 C 频段进行有效抑制。

引入第 2 个陷波采用加载一对分裂环谐振器 (SRR),SRR 是由一对开口方向相反的同心金属环组成<sup>[20]</sup>,其结构及参数设置如图 7 左侧放大图所示,将 SRR 耦合到微带线,可用于阻挡特定的信号频率范围,起到陷波的作用。图 9 上侧为 SRR 谐振器两环间距  $S_3$  长度分别取 0.14、0.16、0.18 mm 时陷波频率及深度的变化

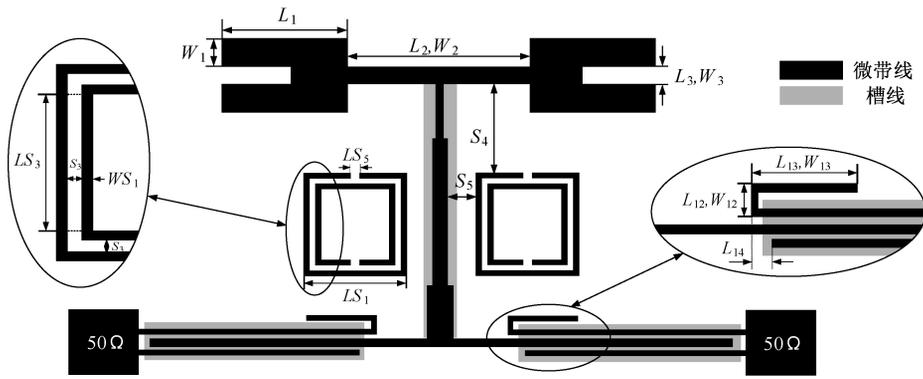


图7 双陷波UWB滤波器结构

Fig. 7 Double notch UWB filter structure

曲线。可观察到随着  $S_3$  长度的增加,第2个陷波的中心频率右移,且陷波深度减小,但对第1个陷波频率及深度几乎不影响。因此可以调节  $S_3$  的长度使陷波频率位于  $7.25 \sim 7.75$  GHz 区间内,结合陷波中心频率及深度,选取对  $S_3 = 0.16$  mm,此时第2陷波中心频率位于  $7.52$  GHz 处,电流集中分布在 SRR 结构,对 X 卫星信号干扰进行有效抑制。

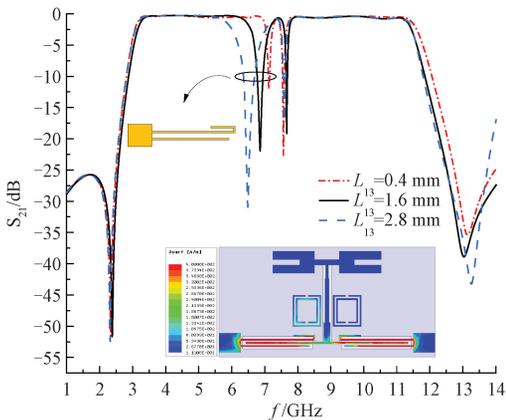


图8  $L_{13}$  的变化对陷波频率影响

Fig. 8 The influence of  $L_{13}$  change on the notch frequency

### 2.2 具有双陷波特性的 UWB 滤波器的仿真实现

经过上述分析,结合陷波中心频率位置及陷波深度越深越好的原则,使用仿真软件 HFSS15.0 不断优化、测试,最终得到两个陷波结构具体大小,如表 2 所示。其仿真曲线  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  及群时延特性曲线如图 10 所示。

表 2 两个陷波结构尺寸大小

Table 2 Dimensions of the two notch structures

变量	数值/mm	变量	数值/mm	变量	数值/mm
$W_{12}$	0.1	$L_{14}$	0.4	$WS_1$	0.1
$L_{12}$	0.2	$LS_1$	2.08	$S_3$	0.14
$W_{13}$	0.1	$LS_3$	1.6	$S_4$	2.2
$L_{13}$	1.6	$LS_5$	0.2	$S_5$	0.3

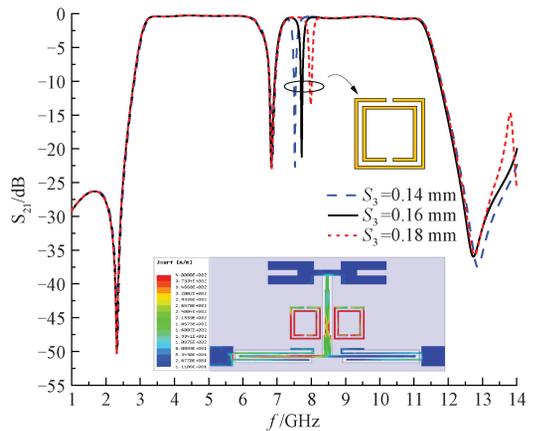


图9  $S_3$  长度的变化对陷波频率的影响

Fig. 9 The influence of the change of  $S_3$  length on the notch frequency

由图 10 可知,滤波器通带为  $3.05 \sim 11.5$  GHz,带内波纹较小,最小插入损耗为  $0.87$  dB,回波损耗均大于  $11.73$  dB,且在两侧传输零点处的衰减均超过  $37.63$  dB,带外抑制性能优良。通带内产生两处陷波:第1处陷波的中心频率为  $6.87$  GHz,  $3$  dB 带宽为  $6.67 \sim 7.06$  GHz,陷波深度达到  $-22$  dB,有效抑制印度国家卫星通信 C 频段的影响;第2处陷波中心频率为  $7.52$  GHz,  $3$  dB 带宽为  $7.47 \sim 7.57$  GHz,陷波深度达到  $-23.34$  dB,有效抑制 X 卫星频段的影响。图 10 中群时延有 4 处地方急剧增大,第 1、4 处分别对应两个传输零点;第 2、3 处分别对应两处陷波。在通带内其余部分基本处于平稳状态,群时延小于  $1.2$  ns。

### 3 实物测试结果分析

结合表 1、2 给出的滤波器尺寸参数,进行实物制作。滤波器实物正面图和背面图如图 11 下侧所示。该双陷

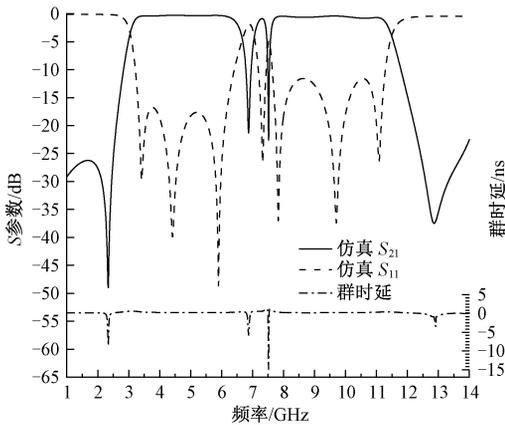


图 10 S 参数及群时延特性曲线

Fig. 10 S parameter and group delay characteristic curve

波超宽带滤波器采用相对介电常数为 6.15 的 Rogers RT/duroid6006 介质基板,其损耗角正切为 0.001 9,基板厚度为 0.635 mm,尺寸大小仅为 16 mm×8 mm。使用矢量网络分析仪 Agilent N5247A 对所制作的滤波器实物进行测试,将测试结果与仿真结果进行对比分析,结果如图 11 所示。图 11 上侧波形可看出,测试结果与仿真结果变化趋势相同,有良好的一致性,但存在偏差。误差原因一方面可能为微带线尺寸较小,在加工时会出现不可避

免地偏差,受到工艺水平限制;另一方面可能为实物焊接及测试环境中产生的误差。

表 3 是本文设计的双陷波滤波器与文献[13,21-25]的性能参数对比。从表 3 可看出,本文设计的滤波器通带性能良好,具有更宽的通带带宽,陷波特性较好,陷波深度均达到 20 dB 以上,在尺寸大小方面具有显著优势,符合现代设计电路小型化的要求,但是陷波数量只有两个,无法滤除在超宽带范围内工作的其他小信号,因此在陷波数量方面还有待增强。

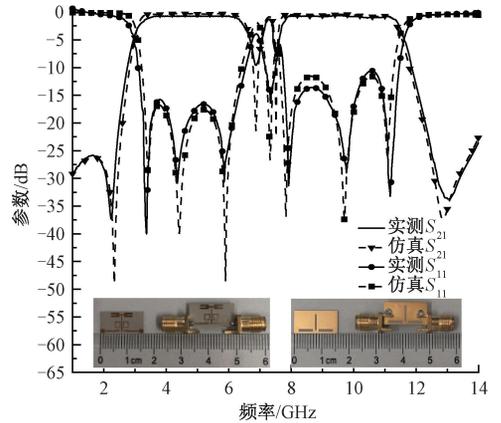


图 11 测试结果与仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of test results and simulation results

表 3 本文设计的 UWB 滤波器与其他文献性能参数对比

Table 3 Comparison of performance parameters of UWB filter designed in this paper and other literature

文献	插入损耗/dB	回波损耗/dB	带宽/GHz	相对带宽	陷波中心频率/GHz	陷波处衰减/dB	尺寸/mm
[13]	<0.6	>20	3.1~10.6	110%	NA	NA	15×8
[21]	<3	>10	2.7~11	121%	5.5	-32	38×32
[22]	<0.3	>20	2.9~10.2	111.45%	5.2	-20	20×30
[23]	<0.5	>20	2.9~12.2	135.76%	5.8	>30	15×30
[24]	<0.5	>10.4	3.0~11.5	118%	5.85	-19	24.64×5.92
[25]	<0.8	>15.5	2.632~10.623	123.9%	3.5/7.5	-28.6/-25.1	32×10
本文	<0.87	>11.73	3.05~11.5	123%	6.87/7.52	-22/-23.34	16×8

## 4 结 论

本文将传统 T 型谐振器进行优化演化,形成一种新型阶梯 T 型谐振器,与输入输出线强耦合形成超宽带结构,并结合缺陷地结构,进步增加带宽,达到 3.05~11.5 GHz 的超宽带范围。分别采用非对称枝节法和耦合 SRR 谐振器法,在 6.87 GHz 与 7.52 GHz 处产生两个陷波。通过仿真软件 HFSS15.0 对模型仿真及实物测试,结果表明,设计的滤波器具有良好的带内性能及带外抑制能力。且滤波器设计结构紧凑,体积较小,满足滤波器小型化的设计要求。

## 参考文献

[1] GAO M M, XU K D, NAN J C, et al. Planar microstrip UWB bandpass filter with quad notched bands and high selectivity [J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2021, 14(4): 493-499.

[2] 杨国成,余慧敏.基于 N 次峰值捕捉的超宽带雷达生命体征检测[J].电子测量与仪器学报,2020,34(11):204-210.

YANG G CH, YU H M. Ultra-wideband radar vital sign detection based on N-time peak capture [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11): 204-210.

[3] 翁浚,刘健宁,邢俊红,等.变数滤波器在捷联惯导系统级标定中的应用[J].电子测量与仪器学报,

- 2021,35 (5):31-37.
- WENG J, LIU J N, XING J H, et al. Application of variable dimension filters in strapdown inertial navigation system level calibration [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35 (5): 31-37.
- [ 4 ] KUMARI P, SARKAR P, GHATAK R. A pythagorean tree fractal shape stub-loaded resonator as a UWB bandpass filter with wide stopband [J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2021, 13(5): 442-446.
- [ 5 ] WICKRAMASINGHE L R, PERERA S. A real-time EMF measuring system for mobile communication towers in sri lanka[J]. *Instrumentation* ,2021,8(2):22-33.
- [ 6 ] 孙伟,李亚丹,黄恒,等. 基于级联滤波的建筑结构信息/惯导室内定位方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 10-16.
- SUN W, LI Y D, HUANG H, et al. Indoor positioning method for building structure information/ inertial navigation based on cascaded filtering [J]. *Journal of Instrument and Meter*, 2021, 42(3): 10-16.
- [ 7 ] 徐诚,王鑫鑫,段世红,等. 基于误差椭圆重采样的粒子滤波跟踪算法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12): 76-84.
- XU CH, WANG X X, DUAN SH H, et al. Particle filter tracking algorithm based on error ellipse resampling [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12): 76-84.
- [ 8 ] SHI X M, XI X L, LIU J F, et al. Novel ultra-wideband (UWB) bandpass filter using multiple-mode resonator [J]. *IEICE Electronics Express*, 2016, 13(11):1-7.
- [ 9 ] SHOME P P, KHAN T. A quintuple mode resonator based bandpass filter for ultra-wideband applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26: 2295-2304.
- [ 10 ] XIE C M, WANG C H. A novel compact UWB bandpass filter with quad-notched bands based on S-SCRLHs resonator[J]. *Frequenz*, 2015, 69(7-8): 329-333.
- [ 11 ] 徐西洋,肖中银. 基于 E 型谐振器的双频带通滤波器设计[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(16): 47-51.
- XU X Y, XIAO ZH Y. Design of dual band pass filter based on E-type resonator [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(16): 47-51.
- [ 12 ] 南敬昌,刘银玲,高明明,等. 小型化分形结构 UWB 天线的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(12): 18-25.
- NAN J CH, LIU Y L, GAO M M , et al. Research on miniaturized fractal structure UWB antenna [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(12): 18-25.
- [ 13 ] XING R X, WANG H, HU Y R, , et al. Digital Predistortion and Measurement Method [ J ]. *Instrumentation*, 2020, 7(2): 60-66.
- [ 14 ] ZHU L, SUN S, MENZEL W. Ultra-wideband (UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005, 15(11): 796-798.
- [ 15 ] WU H W, CHEN Y W, CHEN Y F. New ultra-wideband (UWB) bandpass filter using triangle-ring multi-mode stub-loaded resonator [J]. *Microelectronics Journal*, 2012, 43(11): 857-862.
- [ 16 ] 黄玉兰,黄令超,杨小峰,等. 具有宽阻带特性的四陷波超宽带滤波器[J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(6): 61-66, 78.
- HUANG Y L, HUANG L CH ,YANG X F, et al. A four notch ultra-wideband filter with wide stopband characteristics [J]. *Electronic Components and Materials*, 2020, 39(6): 61-66, 78.
- [ 17 ] YANG H, CHEN J, YANG H L, et al. Design and simulation of a compact ultra-wideband bandpass filter with a notched band using multiple-mode resonator technique [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2016, 23(1): 86-90.
- [ 18 ] KAMMA A, DAS R, BHATT D, et al. Multi mode resonators based triple band notch UWB filter [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(2): 120-122.
- [ 19 ] KUMARI P, PAL M, SARKAR P, et al. Compact UWB bandpass filter with dual-notch bands using asymmetric tri-section stepped impedance resonator [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018, 28(6): e21292. 1-e21292. 8.
- [ 20 ] CHOUDHARY D K, CHAUDHARY R K. Miniaturized quad-band filter with improved selectivity using split ring resonators and metallic strips [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2021, 31(10): e22809. 1- e22809. 9.
- [ 21 ] SANGAM R S, KSHETRIMAYUM R S. Notched UWB filter using exponential tapered impedance line stub loaded microstrip resonator [J]. *The Instituion of Engineering and Technology*, 2018, 2018(9): 768-772.
- [ 22 ] AZIZI S, GHARBI M E, AHYOUD S, et al. Design and analysis of compact microstrip UWB band pass filter with a notched band using defected microstrip structure [J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 32: 669-674.
- [ 23 ] BAKALI H E O E, ELFTOUH H, FARKHSI A, et al. A compact UWB bandpass filter with WLAN band rejection using hybrid technique [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 46: 922-926.

- [24] ZHANG T, XIAO F, BAO J F, et al. A compact UWB bandpass filter with a notched band using a multistubs loaded resonator [ J ]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2017, 27(1): e21054. 1-e21054. 7.
- [25] ZHENG X M, PAN Y W, JIANG T. UWB bandpass filter with dual notched bands using T-shaped resonator and L-shaped defected microstrip structure [ J ]. Micromachines, 2018, 9(6): 280-291.

作者简介



高明明, 分别于 2003、2009、2015 年在辽宁工程技术大学获得学士、硕士、博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为射频电路与系统、射频器件行为模型建模、预失真技术、人工智能等。

E-mail: gaomingming2080@163.com

**Gao Mingming** received her B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Liaoning Technical University in 2003, 2009 and 2015, respectively. Now she is an associate professor at Liaoning Technical University. Her main research interests include RF circuit and system, RF device behavior modeling, predistortion technology and artificial intelligence, etc.



张雪曼, 2020 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为射频电路仿真与射频无源滤波器设计。

E-mail: 910389432@qq.com

**Zhang Xueman** received her B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2020. Now she is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include RF circuit simulation and RF passive filter design.



南敬昌, 分别于 1993、2003 年在辽宁工程技术大学获得学士、硕士学位, 在 2007 年获得北京邮电大学的博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为射频电路与器件、多媒体信息编码和通信系统仿真等。

E-mail: 185900838@qq.com

**Nan Jingchang** received his B. Sc. degree, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 1993 and 2003, and received Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2007. Now he is a professor at Liaoning Technical University. His main research interests include RF circuits and devices, multimedia information coding and communication system simulation, etc.