

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240101.

光电器件研究与应用

李君,张杨,刘金仙,等.一种具有双陷波的超宽带滤波器设计[J].光通信研究,2025(5):240101.

Li J, Zhang Y, Liu J X, et al. Design of Ultra Wideband Filter with Double Notch[J]. Study on Optical Communications, 2025(5): 240101.

一种具有双陷波的超宽带滤波器设计

李君¹,张杨²,刘金仙³,何小春⁴

(1. 浙江长征职业技术学院 智能技术学院,杭州 310023; 2. 广东理工学院 信息技术学院,广东 肇庆 526100;
3. 浙江大学 计算机科学与技术学院,杭州 310027; 4. 浙江吉利控股集团有限公司,杭州 310000)

摘要:【目的】文章旨在提高超宽带(UWB)通信系统的通信质量,并消除来自其他无线窄带通信系统的干扰。为此设计了一款基于新型多模谐振器的UWB滤波器。【方法】首先,通过非对称耦合结构和耦合谐振器结构创新性地引入了两个陷波,两个陷波分别位于6.0和7.6 GHz频段,有效屏蔽了C频段与X频段信号对UWB通信系统的潜在干扰;其次,针对扇形多模谐振器难以引入陷波的难题,提出了扇形圆环谐振器与开路线谐振器级联的解决方案,成功实现了陷波功能。【结果】通过电磁仿真软件的验证,该UWB滤波器的工作频段为3.68~10.20 GHz,相对带宽超过96%,且在整个工作频段内插入损耗小于1 dB。尤为关键的是,在6.0和7.6 GHz处,滤波器展示了显著的陷波特性和深度,陷波深度均超过-20 dB,显著降低了杂散信号对UWB系统通信质量的潜在影响。【结论】文章所设计的UWB滤波器不仅确保了室内UWB系统的通信质量,还通过引入陷波功能有效抑制了外部干扰,为UWB通信系统的稳定运行提供了重要保障。

关键词:超宽带;多模谐振器;双陷波;非对称耦合结构

中图分类号:TN713 **文献标志码:**A

Design of Ultra Wideband Filter with Double Notch

LI Jun¹, ZHANG Yang², LIU Jinxian³, HE Xiaochun⁴

(1. Department of Intelligent Technology, Zhejiang Changzheng Vocational and Technical College, Hangzhou 310023, China;
2. School of Information Technology, Guangdong University of Technology, Zhaoqing 526100, China;
3. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
4. Zhejiang Geely Holding Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: 【Objective】To enhance the communication quality of Ultra Wideband (UWB) systems and eliminate interference from other narrowband wireless services, a novel UWB filter based on a multimode resonator is proposed. 【Methods】Two rejection notches are introduced innovatively via an asymmetric coupling structure combined with coupled resonators, precisely located at 6.0 and 7.6 GHz to suppress potential C- and X-band interference. To overcome the difficulty of generating notches in conventional sector multimode resonators, a cascaded configuration of a sector-ring resonator and an open-circuited stub resonator is devised, successfully realizing the desired notch functionality. 【Results】Electromagnetic simulations confirm that the filter operates from 3.68~10.20 GHz with a fractional bandwidth exceeding 96% and an insertion loss below 1 dB across the entire band. Critically, deep notches (> -20 dB) are achieved at 6.0 and 7.6 GHz, markedly attenuating spurious signals that could degrade UWB system performance. 【Conclusion】In summary, the proposed UWB filter not only safeguards indoor UWB communication quality but also effectively suppresses external interference through its dual-notch design, providing a robust solution for reliable UWB system operation.

Key words: UWB; multimode resonator; double notch; asymmetric coupled structure

0 引言

超宽带(Ultra Wideband, UWB)滤波器在保证通带特性的同时还应具有陷波特性和深度,使其他无线窄带通信系统信号被抑制,确保UWB系统的通信质量^[1-4]。文献[5]提出了级联高通滤波器与低通滤波器来设计UWB滤波器的方案,并凭借低通滤波器的阻带特性实现具有宽阻带UWB的滤波器,但

低通滤波器与高通滤波器级联结构在级联处进行阻抗匹配困难,且增加了滤波器的整体尺寸;文献[6]提出使用多模谐振器结构设计UWB滤波器,此种结构是通过将谐振器谐振点放置在所需工作频段内,再通过强耦合使之完成UWB滤波器设计,此种方法设计灵活、结构紧凑,一经提出便成为了设计UWB滤波器的主流方法;文献[7]使用工字型多模谐振器设计UWB滤波器,并利用非对称耦合结构

收稿日期:2024-05-22; 修回日期:2024-06-03; 纸质出版日期:2025-10-10

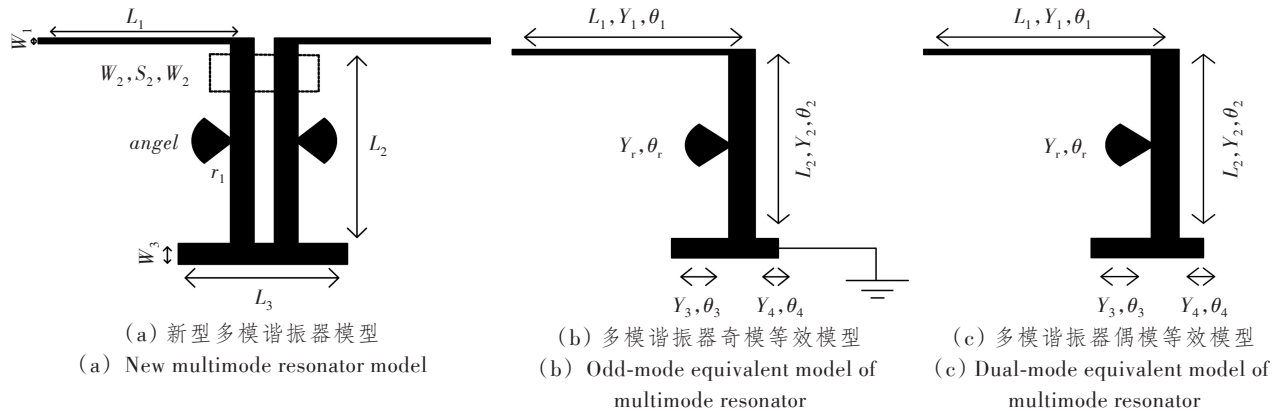
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61864004)

作者简介:李君(1981-),女,浙江温州人。副教授,硕士,主要研究方向为电子通信技术。

通信作者:张杨,硕士。E-mail: 2960157649@qq.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

得到一个陷波点,但陷波点个数较少,且陷波深度不足;文献[8]通过利用缺陷地结构设计 UWB 滤波器,虽具有两个陷波点,但缺陷地结构会增加辐射损耗,使电路元件之间相互耦合,影响滤波器的频率选择性。基于上述研究,本文基于新型多模谐振器设计了一款具有双陷波的 UWB 滤波器,利用非对称耦合结构和耦合传输线的方式引入两个陷波。最终实现的具有双陷波的 UWB 滤波器分别在 6.0 与 7.6 GHz 处各拥有一个陷波,有效抑制了杂散信号对 UWB 系统的干扰。



注: $L_1 \sim L_3$ 和 $W_1 \sim W_3$ 分别为谐振枝节的长度和宽度; $angel$ 和 r_1 分别为扇形谐振枝节的长度和半径; S_2 为平行枝节间的距离。

图 1 多模谐振器及其奇、偶模等效模型

Figure 1 Multi-mode resonator and its parity mode equivalent model

对于奇模谐振等效模型而言,在奇模激励下总输入导纳 Y_{in}^o 为

$$Y_{in}^o = Y_1 \frac{Y_{in2} + jY_1 \tan \theta_1}{Y_1 + jY_{in2} \tan \theta_1}, \quad (1)$$

$$Y_{in2} = Y_2 \frac{Y_L + jY_2 \tan \theta_2}{Y_2 + jY_L \tan \theta_2}, \quad (2)$$

$$Y_L = jY_3 \tan \theta_3 - jY_4 \cot \theta_4 + jY_r \tan \theta_r, \quad (3)$$

式中, j 为虚部单位, 谐振条件要求导纳虚部为 0。

同理,在偶模激励下,偶模等效模型的总输入导纳 Y_{in}^e 为

$$Y_{in}^e = Y_1 \frac{Y_{in2} + jY_1 \tan \theta_1}{Y_1 + jY_{in2} \tan \theta_1}, \quad (4)$$

$$Y_{in2} = Y_2 \frac{Y_L + jY_2 \tan \theta_2}{Y_2 + jY_L \tan \theta_2}, \quad (5)$$

$$Y_L = jY_3 \tan \theta_3 + jY_4 \tan \theta_4 + jY_r \tan \theta_r. \quad (6)$$

根据谐振条件 $\text{Im}(Y_{in} = 0)$, Im 表示虚部, 可知, 当发生谐振时, 该多模谐振器的奇偶模阻抗

$$Y_{in}^e = Y_{in}^o = 0, \text{ 令 } k = \frac{Y_1}{Y_2}, k_1 = \frac{Y_1}{Y_r}, k_2 = \frac{Y_2}{Y_r}, Y_3 = Y_4,$$

则该多模谐振器在奇模激励下的谐振条件为

$$\tan \theta_r A + k_2 \tan \theta_2 + k_1 \tan \theta_1 - k_r B = 0, \quad (7)$$

$$A = \tan \theta_2 \tan \theta_1 k, \quad (8)$$

1 UWB 滤波器设计

本文基于新型多模谐振器设计 UWB 滤波器, 该新型多模谐振器如图 1(a) 所示, 图 1(b) 和 1(c) 分别为该新型多模谐振器的奇和偶模等效模型。由于该新型多模谐振器为对称结构, 因此可采用奇、偶模分析法对其进行分析。图 1(b) 和 1(c) 中, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 和 Y_r 及 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 和 θ_r 分别为多模谐振器的枝节导纳与枝节电长度。

$$B = k \tan \theta_1 \tan \theta_2 (\tan \theta_3 - \cot \theta_4) + \cot \theta_4 - \tan \theta_3, \quad (9)$$

式中: $\theta_1 = \beta L_1; \theta_2 = \beta L_2; \theta_3 = \beta L_3; \theta_4 = \beta L_4; \theta_r = \beta L_r$, β 为相位常数, L_4 为多模谐振器长度。

在偶模激励下, 多模谐振器等效模型与在奇模激励下等效模型类似, 不同之处在于对称面是否接地。因此, 对式(1)~式(9)进行分析可知, 该多模谐振器的谐振点分布由整个谐振器的枝节长度共同决定, 可通过调整该多模谐振器的枝节长度来改变多模谐振器的谐振点分布, 使谐振点分布在 UWB 系统的工作频段内。图 2 所示为在弱耦合状态下该多模谐振器的谐振点分布情况。

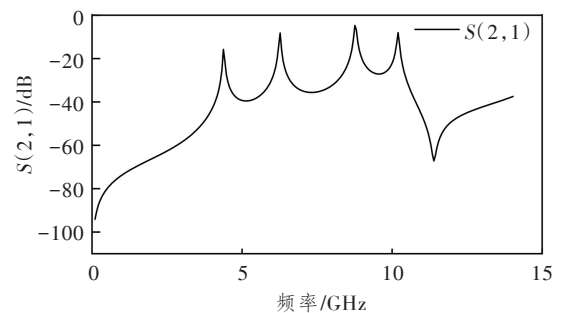


图 2 弱耦合下多模谐振器的谐振点分布
Figure 2 Resonance point distribution of a multimode resonator under weak coupling

结合以上分析,UWB 滤波器整体模型如图 3 所示,为加强耦合,采用交趾耦合方式设计 UWB 滤波器^[9]。

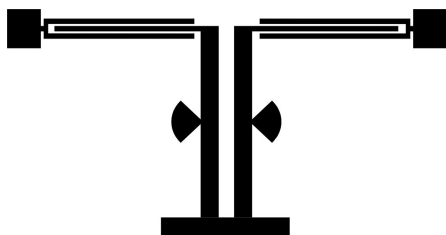


图 3 UWB 滤波器整体模型

Figure 3 Overall model of UWB filter

通过对 UWB 滤波器进行电磁仿真可得该 UWB 滤波器的散射曲线如图 4 所示。由图可知,该 UWB 滤波器工作带宽为 3.4~10.9 GHz,插入损耗 < 0.52 dB,回波损耗 > 12 dB,上频带截止频率处衰减 > 50 dB。

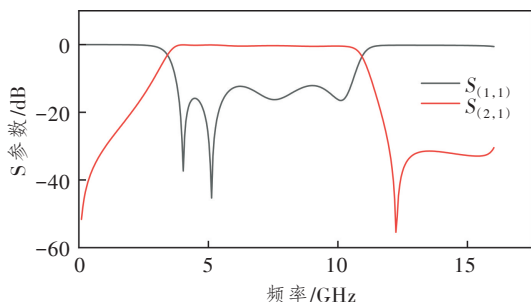


图 4 UWB 滤波器散射曲线图

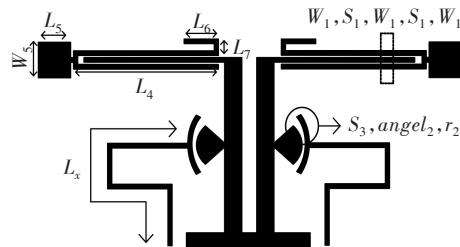
Figure 4 Scattering curve of UWB filter

2 具有双陷波的 UWB 滤波器设计

为使 UWB 系统实现高质量通信,避免其他无线窄带通信系统的干扰,UWB 滤波器应引入陷波以屏蔽杂散信号。目前,引入陷波的主流结构有:利用波抵消理论引入陷波^[10]、加载四分之一波长谐振器^[11]和耦合谐振器^[12]等。

为屏蔽 C 波段与 X 波段信号对 UWB 系统的干扰,本次设计采用非对称耦合结构和耦合谐振器结构分别在 6.0 和 7.6 GHz 处各引入一个陷波,使杂散信号被抑制,保证 UWB 系统的通信质量。具有双陷波的 UWB 滤波器整体结构如图 5 所示。

通过非对称耦合结构引入单陷波,在图 5 中表现为弯折的谐振枝节 L_6 和 L_7 ,对 L_6 和 L_7 进行弯折与输入输出馈线进行耦合。 L_6 作为耦合谐振枝节能够改变其长度调整 UWB 滤波器的陷波频率, L_7 作为控制两个谐振器耦合强度的存在,其长度的改变能够影响 UWB 滤波器陷波的带宽。当 L_6 长度变化时,UWB 滤波器的陷波变化如图 6 所示。



注: r_2 为扇形圆环的半径; $angel_2$ 为扇形圆环的圆心角; S_3 为扇形圆环与多模谐振器之间的间距; L_x 为耦合谐振器结构的谐振器物理长度。

图 5 具有双陷波的 UWB 滤波器模型

Figure 5 UWB filter model with double notch

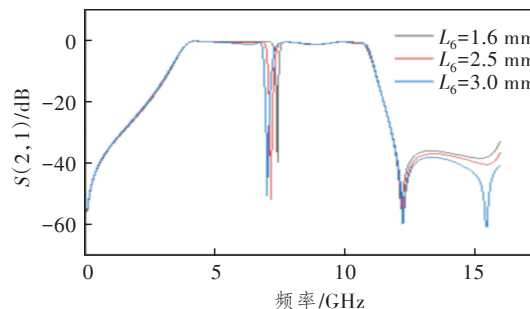


图 6 陷波位置随谐振枝节长度变化的曲线

Figure 6 Notch position variation curve with resonance segment length

由图可知,随着 L_6 长度的增加,陷波位置逐渐从高频向低频转移。为屏蔽 X 波段通信信号对 UWB 系统的干扰,应使陷波位于 7.6 GHz 处。根据图中的结果对 L_6 长度进行调整优化可知,在 $L_6=1.6$ mm 时,陷波位于 7.6 GHz 处。

在保持 UWB 滤波器现有陷波特性的同时,利用耦合谐振器结构引入第 2 个陷波。本文设计的新型多模谐振器加载了扇形多模谐振器,扇形多模谐振器由于其形状特性,谐振器难以与之进行耦合形成陷波。因此,这里利用扇形圆环加载谐振器的方式与其进行耦合,具体结构如图 5 中 S_3 、 $angel_2$ 、 r_2 和 L_x 所示,其中,通过 r_2 与 $angel_2$ 保持谐振器与多模谐振器的耦合宽度;通过 S_3 控制 L_x 代表的谐振器与多模谐振器之间的耦合强度。

利用耦合谐振器结构引入陷波时,陷波位置主要由谐振器长度决定,即能够通过改变 L_x 的长度来对陷波位置进行调整,如下所示^[13]:

$$f = \frac{c}{2L_x \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (10)$$

式中: f 为陷波所在位置的频率; c 为真空中的光速; ϵ_{eff} 为介质基板的有效介电常数。

根据以上分析,对不同长度的谐振器 L_x 进行电磁仿真,仿真结果如图 7 所示。

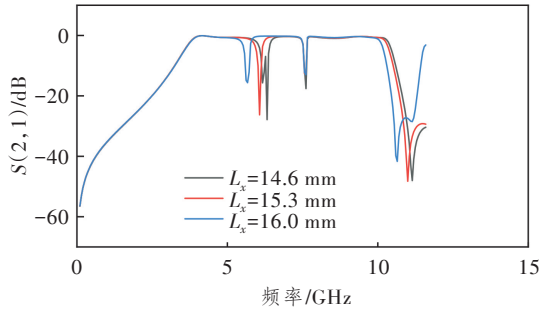


图7 滤波器陷波位置变化曲线

Figure 7 Position change curve of filter notch

由图可知,随着 L_x 的增加,在保持第 1 个陷波位置不变的情况下,引入的第 2 个陷波向低频处偏移。由此可知, L_x 的长度与陷波位置成反比,验证了上文的理论推断。因此,为屏蔽 C 波段信号对 UWB 系统的干扰,需在 6 GHz 处引入陷波。依据图 7 中电磁仿真结果可知,当 $L_x=15.3$ mm 时,该滤波器能在保持原有陷波特性的情况下,同时在 6 GHz 处引入陷波,且陷波深度 >20 dB。

3 仿真结果分析

综合以上分析,对具有双陷波的 UWB 滤波器进行电磁仿真。本次仿真使用 HFSS v21 电磁仿真软件,采用相对介电常数为 4.4 的 Rogers RT/duroid 5880 介质基板,其损耗角正切为 0.001 9,基板厚度为 0.508 mm。通过对其进行优化仿真,结合图 1 与图 5,可得其尺寸参数如表 1 所示,仿真结果如图 8 所示。

表 1 滤波器结构尺寸参数

Table 1 The parameters of filter structure size

参数	数值	参数	数值	参数	数值
W_1 /mm	0.20	L_6 /mm	1.60	$angel_1$ /°	66
W_2 /mm	0.85	L_7 /mm	0.50	$angel_2$ /°	90
W_3 /mm	0.77	L_x /mm	15.30		
W_5 /mm	1.60	S_1 /mm	0.10		
L_1 /mm	7.85	S_2 /mm	0.30		
L_2 /mm	7.50	S_3 /mm	0.20		
L_3 /mm	6.15	r_1 /mm	2.05		
L_4 /mm	7.20	r_2 /mm	2.35		
L_5 /mm	1.56				

由图 8 可知,该 UWB 滤波器 3 dB 带宽为 3.68 ~ 10.20 GHz,通带内插入损耗小于 1 dB,相对带宽大于 96%,且在 6.0 与 7.6 GHz 处各有一个陷波点,陷波深度均大于 20 dB,能有效屏蔽 C 波段与 X 波段对 UWB 通信系统的干扰,保证 UWB 系统的通信质量。

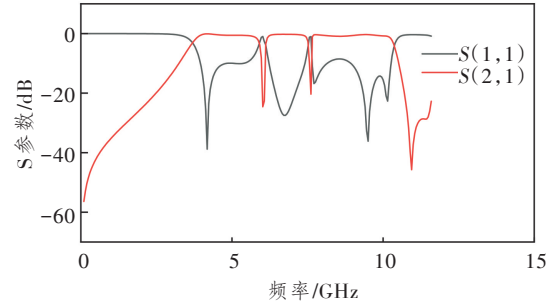


图 8 具有双陷波的 UWB 滤波器仿真曲线

Figure 8 The simulation curve of UWB filter with double notch

表 2 所示为本文设计的 UWB 滤波器与近年来提出的 UWB 滤波器的性能参数对比。由表可知,与文献[14]相比,本文所提设计采用扇形圆环加载谐振器的方式,解决了扇形多模谐振器难以耦合谐振器引入陷波的缺陷,引入了两个陷波,保证了 UWB 系统的通信质量。与文献[15-17]相比,本文所提设计在引入陷波的同时,保证了陷波深度,陷波深度均大于 20 dB,有效控制了杂散信号对 UWB 系统的干扰。

表 2 本文与近年提出的 UWB 滤波器性能对比

Table 2 The comparison of the performance of UWB filters proposed in recent years

文献	相对带宽 (%)	插入损耗/dB	陷波个数	陷波深度/dB
[14]	116	<1.0	0	—
[15]	110	<0.8	1	20.0
[16]	150	<1.2	1	22.0
[17]	112	<0.2	1	15.0
本文	96	<1.0	2	24.5/20.3

4 结束语

本文基于新型多模谐振器设计了一款具有双陷波的 UWB 滤波器,采用非对称耦合结构和耦合谐振器的方式引入两个陷波,屏蔽了 C 频段与 X 频段信号对 UWB 系统的干扰,保证了 UWB 系统的通信质量;通过采用圆环型谐振器耦合扇形多模谐振器结构,解决了扇形多模谐振器难以引入陷波的问题。通过仿真验证了设计的合理性,具有良好的实用价值。

参考文献:

[1] Rekha T K, Abdulla P, Anu A R, et al. High Selectivity and Ultra-wide Stopband Microstrip Lowpass Filter Using High-Low Impedance Resonators[C]//2017 In-

- ternational Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC). Indore, India:IEEE, 2017: 8279042.
- [2] Shome P P, Khan T, Koul S K, et al. Two Decades of UWB Filter Technology: Advances and Emerging Challenges in the Design of UWB Bandpass Filters[J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22(8): 3078040.
- [3] 束耀辉, 汤一铭, 李泽坤. 基于人工表面等离子体的超宽带带通滤波器[J]. 光通信研究, 2025(2): 230186.
Shu Y H, Tang Y M, Li Z K. An Ultra Wideband Bandpass Filter based on Spoof Surface Plasmon Polaritons[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 230186.
- [4] 胡荻, 肖清明, 郑洁. 集成可调谐滤波器的光开关器件技术研究[J]. 光通信研究, 2024(6): 230085.
Hu D, Xiao Q M, Zheng J. Research on Technology of Optical Switch Devices with Integrated Tunable Filters [J]. Study on Optical Communications, 2024(6): 230085.
- [5] Ghatak R, Sarkar P, Mishra R K, et al. A Compact UWB Bandpass Filter with Embedded SIR as Band Notch Structure [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(5): 261–263.
- [6] 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.
- [7] Shan Q, Chen C, Wu W. Design of an UWB Bandpass Filter with a Notched Band Using Asymmetric Loading Stubs[C]//2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Beijing, China:IEEE, 2016: 7761791.
- [8] Song Y, Yang G M, Wen G. Compact UWB Bandpass Filter with Dual Notched Bands Using Defected Ground Structures [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(4): 230–232.
- [9] Lalbakhsh A, Alizadeh S M, Ghaderi A, et al. A Design of a Dual-Band Bandpass Filter based on Modal Analysis for Modern Communication Systems [J]. Electronics, 2020, 9(11): 1770.
- [10] Gao X, Feng W, Che W. Compact Ultra-Wideband Bandpass Filter with Improved Upper Stopband Using Open/Shorted Stubs [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(2): 123–125.
- [11] 南敬昌, 左嫣然, 高明明. 一种基于开路枝节加载的新型双陷波超宽带滤波器[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(6): 976–983.
Nan J C, Zuo Y R, Gao M M. A Novel UWB Filter with Dual Notched Bands based on Open-Circuit Stub Loading [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(6): 976–983.
- [12] 高明明, 徐克达, 房少军, 等. 基于倒 π 型谐振器的双陷波微型超宽带滤波器设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2020, 40(4): 258–263.
Gao M M, Xu K D, Fang S J, et al. Design of Double-Notched Micro UWB Filter based on Inverted Π -type Resonator [J]. Research & Progress of SSE, 2020, 40(4): 258–263.
- [13] Kumar S, Gupta R D, Parihar M S. Multiple Band Notched Filter Using C-Shaped and E-Shaped Resonator for UWB Applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(5): 340–342.
- [14] Mohammadi B, Nourinia J, Ghobadi C, et al. Design and Analysis of the Stub and Radial-Stub Loaded Resonator Band-Pass Filter with Cross-Shaped Coupled Feed-Lines for UWB Applications [J]. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), 2013, 28(9): 851–857.
- [15] Xu J, Wu W, Kang W, et al. Compact UWB Bandpass Filter with a Notched Band Using Radial Stub Loaded Resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(7): 351–353.
- [16] 侯明, 胡雨婷, 张杨, 等. 一种带陷波零点的新型超宽带带通滤波器[J]. 现代电子技术, 2023, 46(13): 7–11.
Hou M, Hu Y T, Zhang Y, et al. A Novel UWB Bandpass Filter with Notch Zero [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(13): 7–11.
- [17] 左嫣然, 刘文进, 南敬昌, 等. 基于多模谐振器的陷波特性和滤波器设计[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(2): 76–81.
Zuo Y R, Liu W J, Nan J C, et al. Design of Filter with Notch Bands based on Multi-Mode Resonator [J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(2): 76–81.