

文章编号: 1671-7449(2024)03-0337-08

多频连续可调的可重构滤波天线

史洋一¹, 高小强², 陆畅¹, 段俊萍^{1*}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 杭州汇丰工程管理有限公司, 浙江 杭州 311300)

摘要: 设计了一种多频连续可调的可重构滤波天线。首先将2个加载变容二极管的1/4波长阶跃阻抗谐振器(Step Impedance Resonator, SIR)带通滤波器与50 Ω微带传输线集成, 得到一个可重构滤波馈电网络, 通过控制6个PIN二极管的通断状态, 实现超宽带与窄带模式的切换, 同时分析了馈电网络对应的等效电路。另外, 设计了一款工作频率覆盖可调滤波器通带范围的分形超宽带天线, 并将二者集成实现滤波天线。对该天线设计进行了仿真优化和实物测试, 结果表明, 该天线能够在WiMAX窄带连续可调、WLAN窄带连续可调和超宽带3种模式下工作, 且均具有良好的辐射特性, 可广泛应用于多频段无线通信中。

关键词: 滤波天线; 频率可重构; 带通滤波器; 超宽带分形天线; 阶跃阻抗谐振器

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024043

引用格式: 史洋一, 高小强, 陆畅, 等. 多频连续可调的可重构滤波天线[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 337-344.

SHI Yangyi, GAO Xiaoqiang, LU Chang, et al. Multi-frequency continuously adjustable reconfigurable filter antenna [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(3): 337-344.

Multi-Frequency Continuously Adjustable Reconfigurable Filter Antenna

SHI Yangyi¹, GAO Xiaoqiang², LU Chang¹, DUAN Junping^{1*}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Hangzhou Huifeng Engineering Management Co., Hangzhou 311300, China)

Abstract: A multi-frequency continuously adjustable reconfigurable filter antenna is designed. Firstly, two 1/4 wavelength SIR Bandpass filters loaded with varactor diodes are integrated with 50 Ω microstrip transmission lines to obtain a reconfigurable filter feed network. By controlling the on-off state of six PIN diodes, the UWB and narrowband modes can be switched. In addition, a fractal ultra-wideband antenna whose operating frequency covers the passband range of the tunable filter is designed, and the two are integrated to realize the filter antenna. The design of the antenna is simulated and tested. The test results show that the antenna can work in WiMAX narrowband continuous tunable mode, WLAN narrowband continuous tunable mode and ultra-wideband mode, and all have good radiation characteristics, which can be widely used in multi-band wireless communication.

Key words: filtering antenna; frequency reconfigurable; bandpass filter; ultra-wideband fractal antenna; step impedance resonator(SIR)

收稿日期: 2023-09-02

基金项目: 国家自然科学基金创新群体资助项目(51821003); 山西省重点研发资助项目(国际合作)(201803D421043)

作者简介: 史洋一(2000-), 女, 硕士生, 主要从事射频天线研究。E-mail: yangyi_elaine@163.com。

* 通信作者: 段俊萍(1979-), 女, 副教授, 主要从事射频微波器件研究。E-mail: duanjunping@nuc.edu.cn。

0 引言

随着现代无线通信技术的迅速发展,如何实现天线的小型化^[1-2]和多频化成为当下的研究热点,同时具有滤波特性和信号辐射特性的滤波天线得到了国内外学者的广泛关注。但传统的单频滤波天线只能对单个频段外的信号进行抑制,当设计指标改变时就需要重新设计其工作频段,这无疑增加了系统的设计成本^[3-4]。为了解决这个问题,张胜等^[5]采用综合设计方法,通过金属通孔实现感性源负载耦合,产生辐射零点,实现双频通带可调,提升带外选择性能。傅世强等^[6]、王闻炜等^[7]、诸葛琪皓等^[8]通过设计多个辐射单元,在工作频带外引入辐射零点,虽然没有增加额外的电路,但是这种方法设计较为复杂,通常需要多层基板叠加,不利于天线的小型化。

为了适应更多的应用场景,对可重构技术的研究也越来越多。一类是设计的辐射单元具有可重构特性,通过改变天线单元的电流方向来控制天线^[9]。另一类是利用集成电路的开关型器件实现馈电网络模式的切换,一些研究人员利用MEMS开关或PIN二极管来控制电路的通断,以此实现可重构功能,这种方法已有广泛的应用且设计更加简洁方便^[10-13]。

本文提出了一种基于可重构馈电网络的具有超宽带和两个窄带连续可调工作模式的滤波天线,该天线具有抗干扰能力强、结构紧凑、中心频率连续可调等优点,能够很好地适应复杂的电磁环境。

1 可重构滤波馈电网络

本文设计了具有多种选频模式的可重构滤波馈电网络,其结构如图1所示。

该馈电网络由2个频率连续可调的带通滤波器(R_1 、 R_2)与 $50\ \Omega$ 微带馈线集成,滤波器 R_1 的尺寸参数为: $L_2=7.05\ \text{mm}$, $L_3=11.6\ \text{mm}$, $L_4=2.5\ \text{mm}$, $W_2=0.43\ \text{mm}$, $W_3=3\ \text{mm}$, $W_{x1}=0.45\ \text{mm}$, $S_1=0.1\ \text{mm}$, $S_2=0.1\ \text{mm}$;滤波器 R_2 的尺寸参数为: $L_5=6.2\ \text{mm}$, $L_6=5.8\ \text{mm}$, $W_4=0.5\ \text{mm}$, $W_5=2\ \text{mm}$, $W_{x2}=0.45\ \text{mm}$, $S_3=0.2\ \text{mm}$, $S_4=0.2\ \text{mm}$ 。带通滤波器(R_1 、 R_2)的原型为两组不同尺寸的1/4波长的阶跃阻抗谐振器(Step Impedance Resonator, SIR),采用独立路径与输入/输出短路微带馈线耦合。通过在每个SIR末端加载变容二极管并接地的方式,实

现滤波器通带的中心频率和带宽连续可调谐。其中 V_1 、 V_2 为调节可变电容 C_1 、 C_2 电容值的两组偏置电压。输入/输出微带短路馈线之间采用源与负载交叉耦合的方式,可以在滤波通带两侧引入传输零点,从而提升滤波器的频率选择性和带外抑制水平。

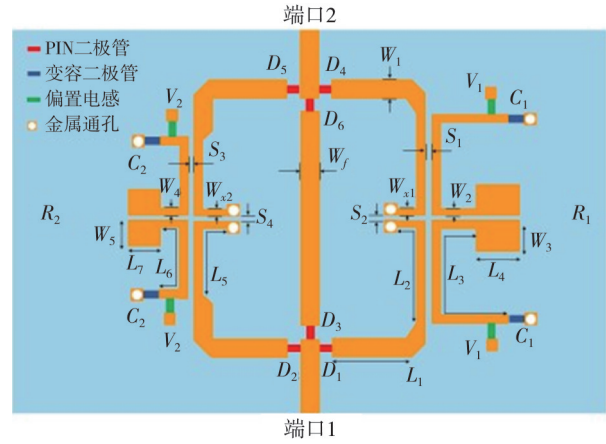


图1 可重构滤波馈电网络

Fig. 1 Reconfigurable filter feed network

为了分析滤波器谐振频率与谐振器特性阻抗和电长度的关系,可以将其等效为如图2的电路模型。

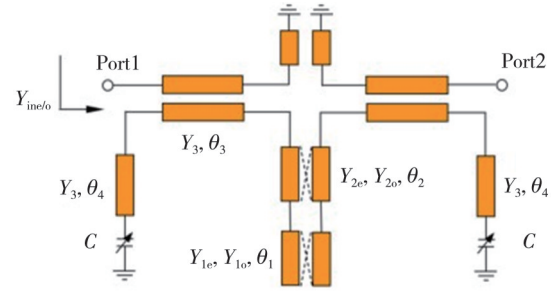


图2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

由于输入输出端结构的对称性,可以采用奇偶模分析法对滤波器的等效电路进行分析,输入输出端口奇模和偶模的输入导纳可以表示为

$$Y_{\text{ino}} = Y_{\text{ro}} + A, \quad (1)$$

$$Y_{\text{ine}} = Y_{\text{re}} + A, \quad (2)$$

其中

$$A = \frac{jY_3\omega C}{Y_3 - \omega C \tan\theta_4}, \quad (3)$$

$$Y_{\text{ro}} = Y_3 \cdot \frac{jY_{2o}Y_{o1} + jY_3Y_{o2}\tan\theta_3}{Y_3Y_{o2} - Y_{2o}Y_{o1}\tan\theta_4}, \quad (4)$$

$$Y_{\text{re}} = Y_3 \cdot \frac{jY_{2e}Y_{e1} + jY_3Y_{e2}\tan\theta_3}{Y_3Y_{e2} - Y_{2e}Y_{e1}\tan\theta_4}, \quad (5)$$

$$Y_{o1} = Y_{1o}\tan\theta_1 + Y_{2o}\tan\theta_2, \quad (6)$$

$$Y_{o2} = Y_{2o} - Y_{1o}\tan\theta_1\tan\theta_2, \quad (7)$$

$$Y_{e1} = Y_{1e}\tan\theta_1 + Y_{2e}\tan\theta_2, \quad (8)$$

$$Y_{e2} = Y_{2e} - Y_{1e} \tan \theta_1 \tan \theta_2, \quad (9)$$

ω 为角频率, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 为谐振器中 4 段微带线的等效长度。将 Y_r 定义为

$$Y_r = \frac{(Y_{re} + Y_{ro})}{2}, \quad (10)$$

那么, port1 端口的输入导纳可以表示为

$$Y = A + Y_r. \quad (11)$$

根据谐振条件可知, 输入导纳的虚部 $\text{Im}[Y(\omega)] = 0$ 时, 可以确定谐振角频率 ω_0 仅受电容值 C 的影响, 且 ω_0 与电容值 C 成反比, 因此, 频

率调谐范围可以通过变容二极管的值来调谐。

对滤波器 R_1 和 R_2 进行建模仿真分析, 得到其 S 参数随电容值的变化曲线。如图 3 所示, 当可变电容 C_1 从 0.44 pF 调谐到 2.2 pF 时, 滤波器 R_1 通带的中心频率从 3.83 GHz 调谐到 2.64 GHz, 可调范围达到 35.8%, 3 dB 带宽由 170 MHz 变化到 230 MHz, 带内插入损耗最小仅为 1 dB, 且调谐过程中回波损耗均高于 15 dB, 通带两侧均有传输零点, 因此, 滤波器 R_1 具有优异的带外抑制水平和频率选择性。

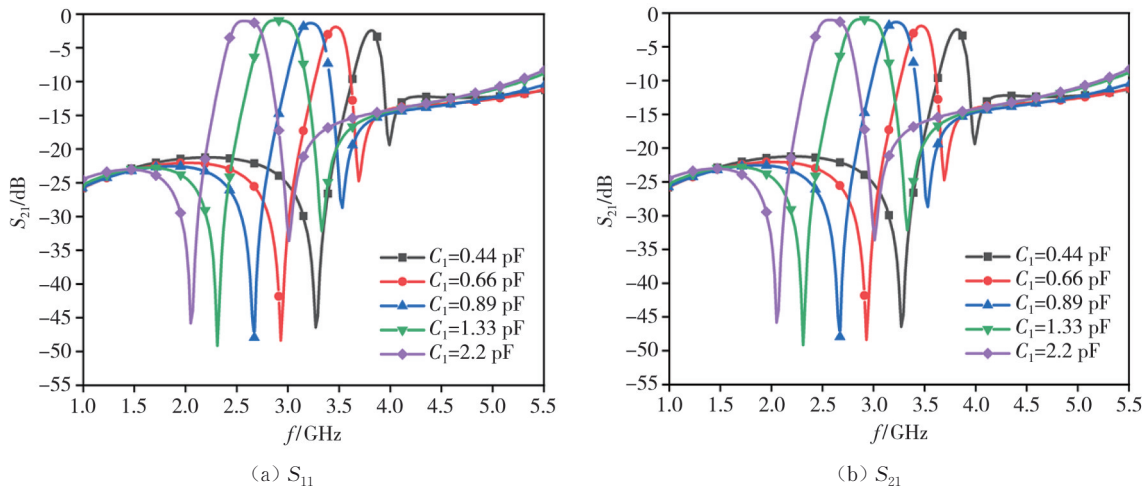


图 3 滤波器 R_1 的 S 参数随电容值 C_1 的变化曲线

Fig. 3 The S parameter of filter R_1 varies with capacitance value C_1

从图 4 中可以看出, 当可变电容 C_2 的值从 0.44 pF 调谐到 2.2 pF 时, 滤波器 R_2 的中心频率从 5.51 GHz 变化到 4.02 GHz, 调谐范围达到了

31.3%, 3 dB 带宽由 80 MHz 变化到 200 MHz, 插入损耗最小仅为 2.4 dB, 且在整个调谐过程中, 回波损耗均高于 18 dB, 通带两侧均有 2 个传输零点。

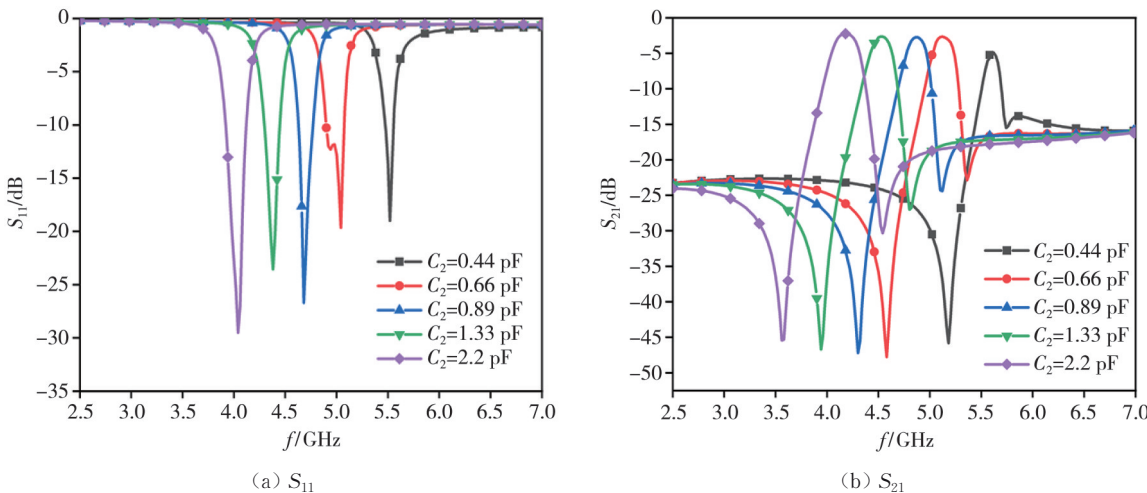


图 4 滤波器 R_2 的 S 参数随电容值 C_2 的变化曲线

Fig. 4 S parameter of filter R_2 varies with capacitance value C_2

可重构馈电网络具有 3 条独立的传输路径, 通过 6 个 PIN 二极管的通断状态来选择启用不同的 RF

传输路径, 实现不同的选频功能。当开关 D_1, D_4 导通, 其余开关均断开时, RF 信号通过滤波器 R_1 传输;

当开关 D_2 、 D_5 导通，其余开关均断开时，RF信号通过滤波器 R_2 传输；当开关 D_3 、 D_6 导通，其余开关均断开时，RF信号通过 $50\ \Omega$ 微带线传输，相当于一个全通滤波器，实现超宽带响应，其回波损耗的值均大于20 dB，插入损耗小于1.5 dB。

2 超宽带分形天线

为了实现滤波馈电网络和天线的集成，本文以正六边形嵌套圆形为基础结构，设计了一款频段能够完全覆盖馈电网络的两种连续可调窄带范围的宽带天线，如图5所示。由于分形结构具有自相似性和空间延展性能，能够延长天线表面电流路径，从而拓展天线的阻抗带宽，因此，天线正面辐射贴片部分采用正六边形嵌套圆形的四阶分形结构，背面采用矩形的接地板。超宽带分形天线最终的尺寸为： $L_0=46\ \text{mm}$ ， $L_f=25.2\ \text{mm}$ ， $L_g=24.3\ \text{mm}$ ， $W_0=30\ \text{mm}$ ， $W_f=1.16\ \text{mm}$ ， $R_0=7.79\ \text{mm}$ ， $R_1=6.45\ \text{mm}$ ， $R_2=5.34\ \text{mm}$ ， $R_3=4.43\ \text{mm}$ ， $R_4=3.4\ \text{mm}$ ， $D=9.5\ \text{mm}$ 。

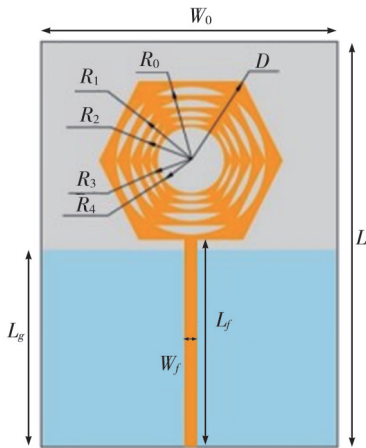


图5 超宽带分形天线结构

Fig. 5 Ultra-wideband fractal antenna structure

该分形天线的设计步骤如图6所示。首先将中心在同一点的正六边形和圆形进行嵌套设计，形成初始的0阶结构，将0阶结构按照 $m=0.82$ 的比例缩小后，再将其嵌套在初始结构上形成1阶结构。以此类推，每次迭代时新加载的部分是前一次迭代时新加载部分的0.82倍，分别得到2阶、3阶、4阶的分形结构。

图7为分形天线在不同迭代阶段天线的S参数曲线，相较于基础0阶结构，1阶分形改善了天线中频部分的阻抗匹配特性，降低了回波损耗，经过第2次和第3次的迭代进一步改善了天线中

频部分的阻抗匹配特性，并扩展了高频部分的带宽，经过第4次迭代优化后最终成功实现了2.43~11.8 GHz的带宽，分数带宽高达131.7%，覆盖了整个超宽带频段。

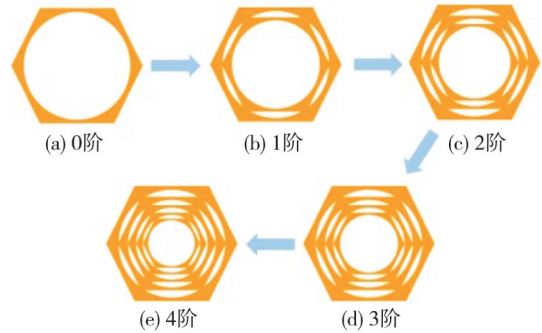


图6 超宽带天线的分形迭代过程

Fig. 6 Fractal iterative process of UWB antenna

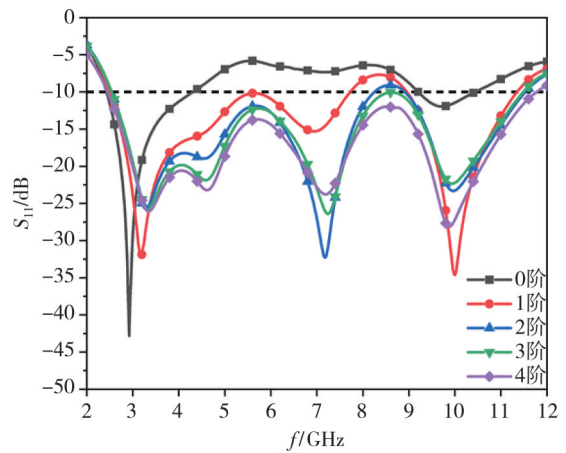


图7 不同迭代阶段天线的S参数变化图

Fig. 7 S parameter diagram of antenna in different iteration stage

图8为分形天线在不同迭代阶段的增益曲线，从图中可以看出，E面和H面的增益随着天线的迭代逐渐增大，且在4阶时呈现出较好的“8”字形和“O”的全向性。

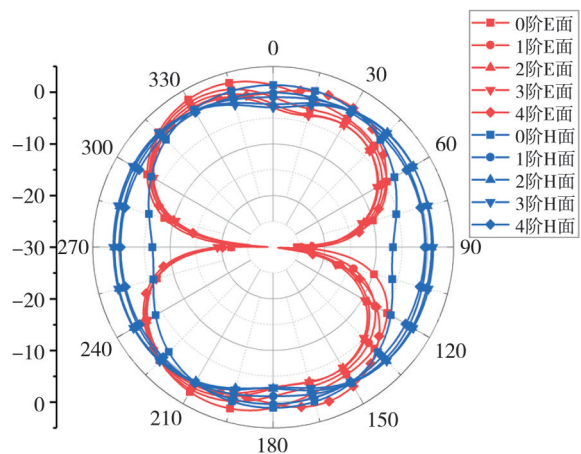


图8 不同迭代阶段天线的增益变化图

Fig. 8 The gain variation of the antenna in different iteration stage

3 仿真及测试分析

将可重构滤波馈电网络和超宽带分形天线进行集成设计,得到如图 9 所示的多频段连续可调的可重构滤波天线。可以通过控制可重构滤波馈电网络中 6 个 PIN 二极管的通断状态,来选择不同的 RF 路径激励辐射天线,从而实现天线在超宽带模式、WiMAX 窄带连续可调和 WLAN 窄带连续可调 3 种工作模式间的切换。

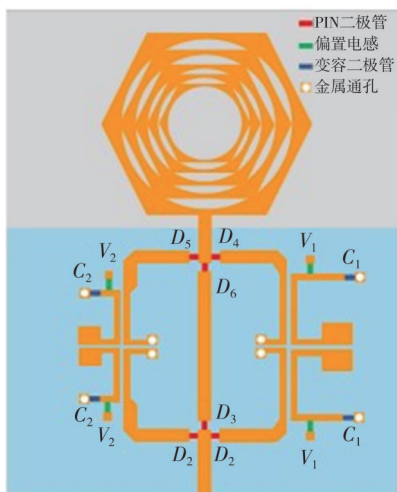


图 9 可重构滤波天线结构图

Fig. 9 Reconfigurable filter antenna structure diagram

为了验证这一设计,对所设计的可重构滤波天线进行了实物加工,如图 10 所示,该设计采用 FR4 作为介质基板,整体尺寸为 30 mm×46 mm×0.6 mm, PIN 二极管的型号为 Skywords SMP1340-079LF,变容二极管的型号为 Skywords SMV2019。

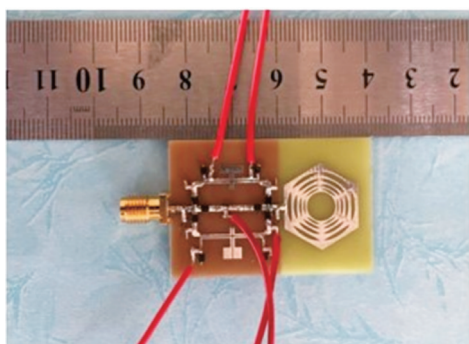
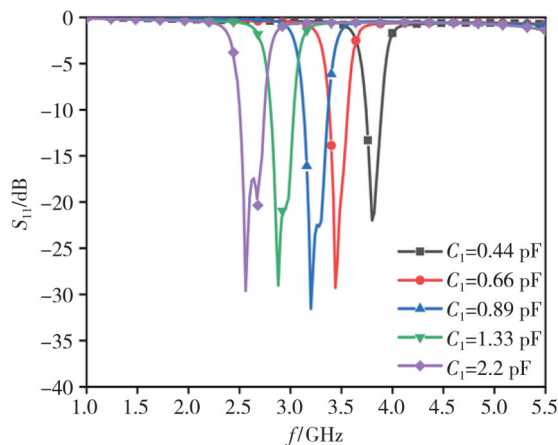


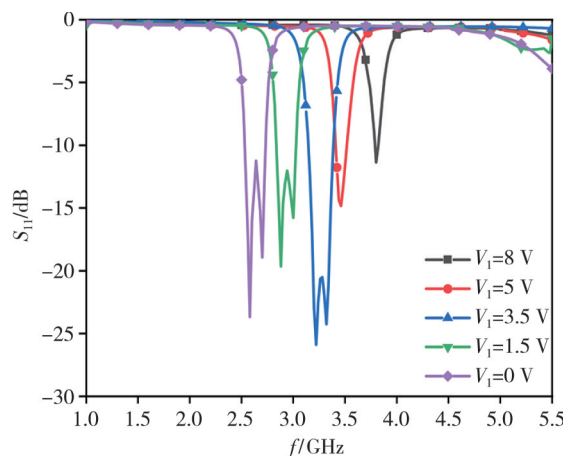
图 10 可重构滤波天线实物图

Fig. 10 Reconfigurable filter antenna physical picture

图 11 为天线在模式 1 状态时, S 参数曲线的仿真与测试结果,可以看出,随着反向偏置电压 V_1 从 0 V 调到 8 V,滤波天线的实测调谐比为 36.4%,与仿真基本吻合。



(a) 仿真 S_{11}

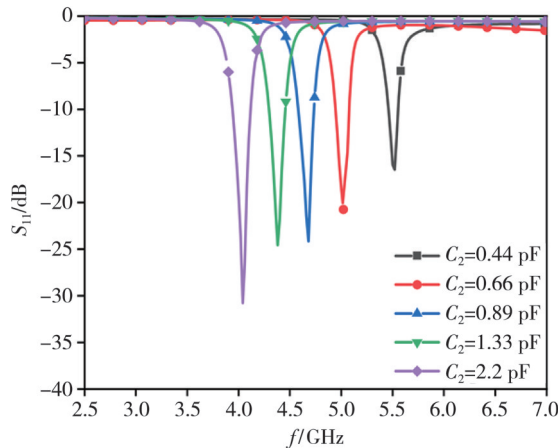


(b) 实测 S_{11}

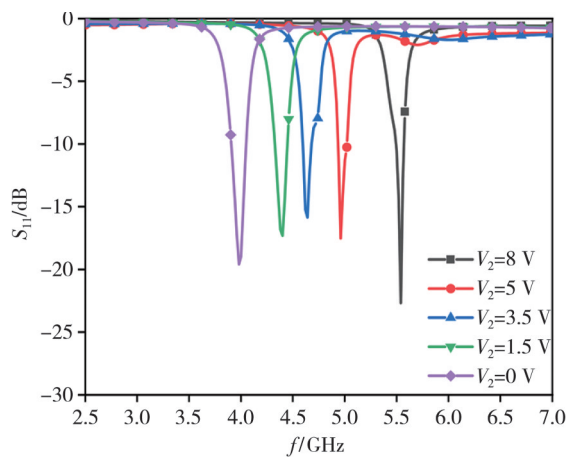
图 11 滤波天线在模式 1 时的 S 参数

Fig. 11 S parameter of filter antenna in mode 1

图 12 为天线在模式 2 状态时, S 参数曲线的仿真与测试结果,可以看出,随着反向偏置电压 V_1 从 8 V 调到 0 V,滤波天线的实测调谐比为 32.1%,实测与仿真结果有较好的一致性。



(a) 仿真 S_{11}



(b) 实测 S_{11}

图 12 滤波天线在模式 2 时的 S 参数

Fig. 12 S parameter of filter antenna in mode 2

图 13 为天线在模式 3 时, S 参数曲线的仿真与测试结果, 滤波天线实测的 -10 dB 阻抗带宽为 $2.4 \sim 11.5$ GHz, 说明天线在此频段能够稳定的工作, 实测与仿真结果差异较小, 并且能够完全覆盖 FCC 规定的 UWB 频段, 满足设计要求。

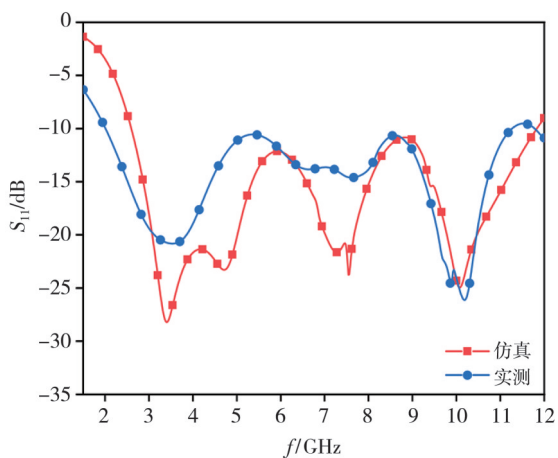


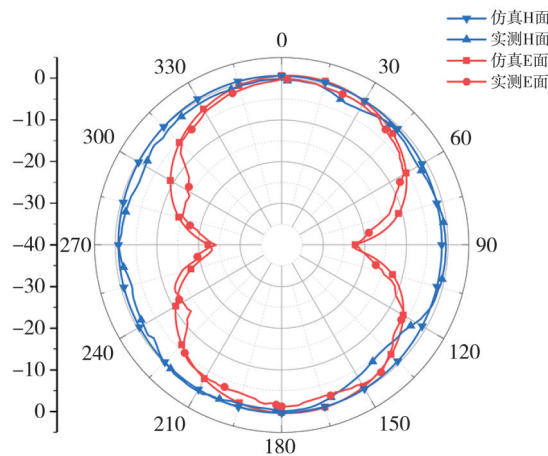
图 13 滤波天线在模式 3 时的 S 参数

Fig. 13 S parameter of filter antenna in mode 3

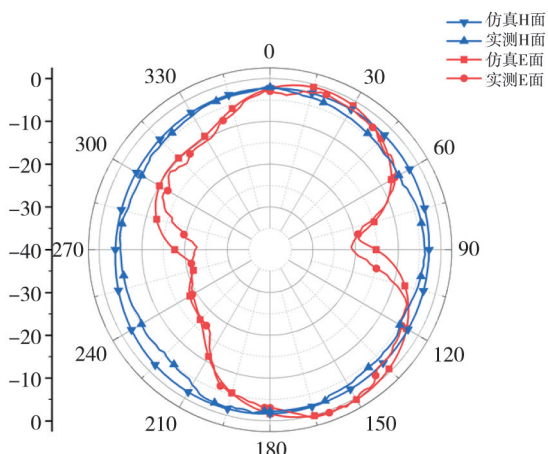
在微波暗室中对滤波天线的方向图和增益进行测试, 图 14(a)和(b)分别为模式 1 时 $C_1=0.66$ pF, 中心频率为 3.5 GHz 处的方向图和模式 2 时 $C_2=0.66$ pF, 中心频率为 5.2 GHz 处的方向图。

模式 3 超宽带状态下, 天线在 3.5 , 5.2 和 8 GHz 处的方向图如图 15 所示。可以看出, 在不同工作模式的相同频点处, 天线的辐射方向图非常相似, E 面 ($yo z$ 平面) 呈现类似于“8”字的形状, 而 H 面 (xoz 平面) 则呈现出类似于“O”的全向性。窄带模式和宽带模式下方向图的振幅略有不同,

这种微小的差异是因为窄带状态下, 能量主要通过馈电网络中的滤波器传输到天线, 滤波器和 2 个变容二极管会产生一定的损耗。



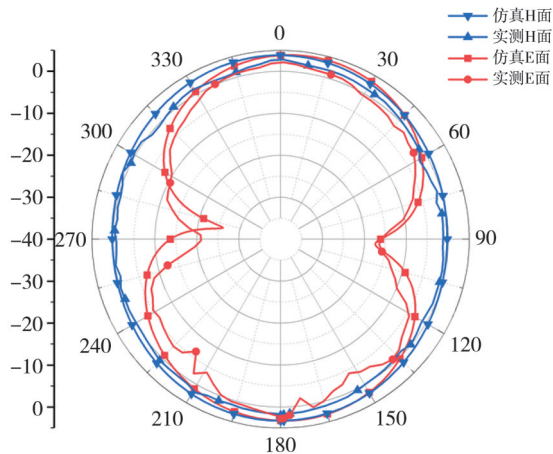
(a) 模式 1 时 3.5 GHz



(b) 模式 2 时 5.2 GHz

图 14 滤波天线在模式 2 时的辐射方向图

Fig. 14 Radiation pattern of the filter antenna in mode 2



(a) 3.5 GHz

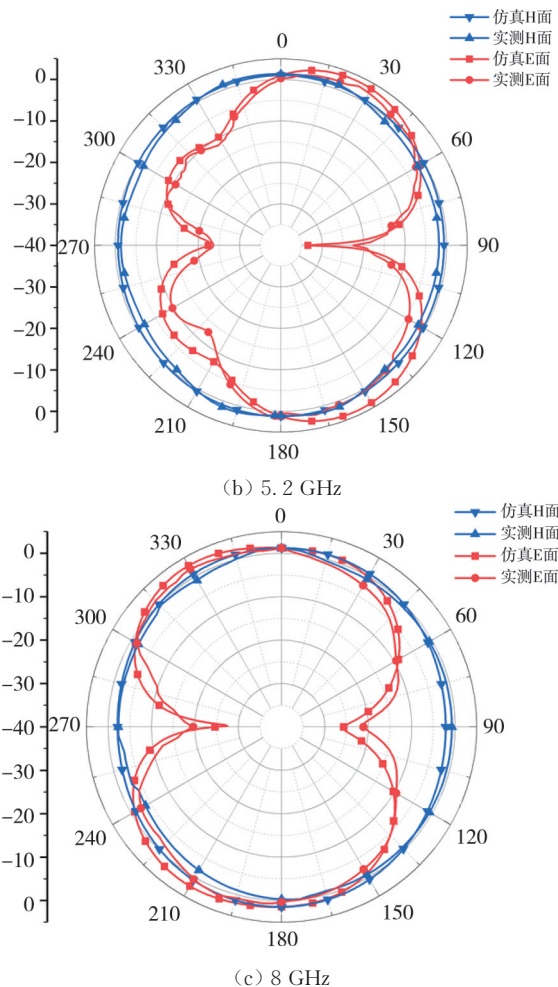


图 15 滤波天线在模式3时的辐射方向图

Fig. 15 Radiation pattern of the filter antenna in mode 3

滤波天线的仿真和实测增益如图 16 所示, 模式 1 状态下实测增益最高可达 4.1 dBi, 模式 2 状态下实测增益最高为 3.5 dBi, 模式 3 状态下实测增益最大能达到 5.8 dBi。在相同频率下, 窄带状态的增益略低于宽带状态, 这是由于馈电网络中集成滤波器的插入损耗造成的。

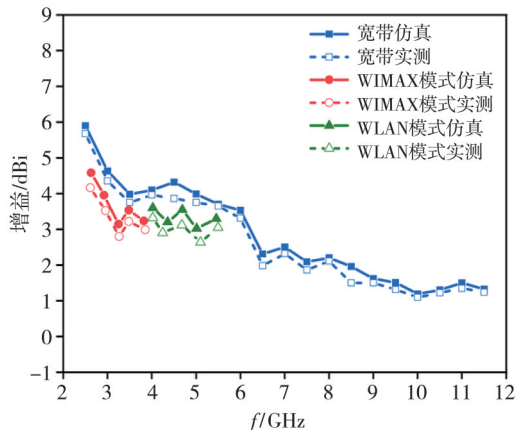


图 16 滤波天线的增益

Fig. 16 The gain of the filter antenna

4 对比分析

表 1 为本文所提天线与类似文献中天线的性能对比分析。可以看出, 与文献[3], [6], [8]相比, 本文所提天线具有频率可重构的功能。其次, 与文献[6], [8]相比, 该天线具有结构简单、成本低等特点。同时与文献[4], [5], [8]相比, 本文设计实现了小型化, 且具备多种选频模式。因此, 本文所提天线能够更好地满足多频段的无线通信系统等应用场景的需要。

表 1 对比分析

Tab. 1 Contrastive analysis

参考文献	尺寸/(mm×mm×mm)	工作模式	基板层数	是否可重构	最大增益/dBi
[3]	100×55×1	单频	1	否	3.45
[4]	75×75×1.5	单频	1	是	7.1
[5]	55×38×1.524	双频	1	是	4.1
[6]	165×165	双频双圆极化	2	否	7.7
[8]	60×40×1.6	单频	2	否	1.85
本文	30×46×0.6	窄带和超宽带	1	是	5.8

5 结论

本文提出了一种具有多种选频模式的 可重构滤波天线。通过控制滤波馈电网络中的 6 个 PIN 二极管的工作状态来选择不同的 RF 路径激励辐射天线, 从而实现天线工作模式在超宽带和 2 个连续可调窄带之间的切换。对设计的天线进行了仿真和实验测试, 3 种模式下的天线均具有良好的辐射特性。在 2 种窄带模式下, 天线的中心频率可调范围分别为 2.63~3.8 GHz 和 3.98~5.5 GHz, 并且在每个通带两侧均有 2 个传输零点, 具有较高的频率选择性; 在超宽带模式下, 测得的阻抗带宽为 2.4~11.5 GHz。该天线结构紧凑, 抗干扰能力强, 能更好地满足多频段的无线通信系统等应用场景的需要。

参考文献:

[1] 李东霞, 丁永红, 尤文斌. 一种 LoRa 微带天线的小型化设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 180-185.
 LI Dongxia, DING Yonghong, YOU Wenbin. Miniaturized design of a LoRa microstrip antenna[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 180-185. (in Chinese)
 [2] YANG T Q, TIAN X L, LOU W Z, et al. High-gain microstrip patch antenna with conformal metamaterials based on topological transformation[J]. Journal

- of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(1): 103-107.
- [3] 秦祥宏. 具备滤波效果的带开路枝节的 PIFA 天线设计[J]. 数字通信世界, 2022(10): 14-17.
QIN Xianghong. PIFA antenna with open-ended stub with filtering function[J]. Digital Communication world, 2022(10): 14-17. (in Chinese)
- [4] 马敬伟, 周东方, 张毅, 等. 一种辐射零点可控的紧凑型滤波贴片天线[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(2): 82-86.
MA Jingwei, ZHOU Dongfang, ZHANG Yi, et al. A compact filtering patch antenna with independent controllable radiation nulls[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(2): 82-86. (in Chinese)
- [5] 张胜, 仝梦寒, 谢振江, 等. 基于开口环谐振器的双频通带可调滤波天线[J]. 压电与声光, 2021, 43(5): 609-612.
ZHANG Sheng, TONG Menghan, XIE Zhenjiang, et al. Tuned dual-band filtering antenna based on open-loop resonator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(5): 609-612. (in Chinese)
- [6] 傅世强, 付笑茹, 李婵娟, 等. 一种新型双频双圆极化复合微带天线设计[J]. 电波科学学报, 2023. doi: 10.12265/j. cjors. 2023070.
FU Shiqiang, FU Xiaoru, LI Chanjuan, et al. Design of a new dual-band circularly polarized composite microstrip antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023. doi: 10.12265/j. cjors. 2023070. (in Chinese)
- [7] 王闻炜, 陈春红, 王培阳, 等. 一种全向圆极化滤波微带天线的设计[J]. 微波学报, 2021, 37(S1): 1-4.
WANG Wenwei, CHEN Chunhong, WANG Peiyang, et al. Design of an omnidirectional circularly polarized antenna with filtering response[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(S1): 1-4. (in Chinese)
- [8] 诸葛琪皓, 张文梅, 马润波, 等. 具有高选择性和谐波抑制的滤波天线设计[J]. 测试技术学报, 2022, 36(6): 537-542.
ZHUGE Qihao, ZHANG Wenmei, MA Runbo, et al. Design of a filtering antenna with high selectivity and harmonic suppression [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2022, 36(6): 537-542. (in Chinese)
- [9] 赵丹阳, 崔恒荣, 史振. L波段极化可重构的圆极化滤波天线设计[J]. 无线通信技术, 2021, 30(1): 38-42.
ZHAO Danyang, CUI Hengrong, SHI Zhen. Design of circular polarization filter antenna with L band polarization reconfigurable[J]. Wireless Communication Technology, 2021, 30(1): 38-42. (in Chinese)
- [10] 王彦, 赵建平, 徐娟. 基于超宽带的可重构 5G 天线设计[J]. 通信技术, 2019, 52(10): 2538-2542.
WANG Yan, ZHAO Jianping, XU Juan. Design of reconfigurable 5G antenna based on UWB[J]. Communications Technology, 2019, 52(10): 2538-2542. (in Chinese)
- [11] 黄俊杰. 基于 MEMS 开关的可重构新型天线研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [12] MAO C X, ZHANG L, KHALILY M, et al. Single-pole double-throw filtering switch and its application in pattern reconfigurable antennak[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(2): 1581-1586.
- [13] THANGARASU D, KINGSLY S, KANAGASABAI M, et al. Banwidth reconfigurable filtering antenna[J]. Wireless Personal Communications: An Internaional Journal, 2019, 105(4): 1545-1560.