

文章编号: 1671-7449(2024)06-0661-07

一种结构紧凑的可抑制超宽带谐波的滤波天线

张玉笛, 韩国瑞*, 吴子健, 韩丽萍, 陈新伟, 袁浩

(山西大学 物理工程学院, 山西 太原 030006)

摘要: 采用口径耦合馈电的方式设计了一种结构紧凑的可抑制超宽带谐波的滤波天线, 为了提高近通带的选择性, 在方形辐射贴片两侧放置带有容性负载的矩形寄生贴片, 并在接地板上刻蚀开口矩形环, 分别在上下边带各引入一个辐射零点。为实现超宽带谐波抑制, 在馈线上加载平面耦合滤波结构, 在4~18 GHz频段产生宽阻带, 在接地板上刻蚀H形缝隙并减小接地板尺寸, 进一步拓宽阻带带宽。天线的整体尺寸为40 mm×35 mm×2.4 mm。天线的工作频带为3.35~3.6 GHz, 相对带宽为7.1%, 在上下边带的滚降度分别为94 dB/GHz和54 dB/GHz, 在4~23.48 GHz(6.7 f_0 , f_0 为天线的中心频率)间的反射系数均大于-3 dB。

关键词: 谐波抑制; 辐射零点; 滤波天线; 缺陷地结构

中图分类号: TN823+.27

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024082

引用格式: 张玉笛, 韩国瑞, 吴子健, 等. 一种结构紧凑的可抑制超宽带谐波的滤波天线[J]. 测试技术学报, 2024, 38(6): 661-667.

ZHANG Yudi, HAN Guorui, WU Zijian, et al. A compact filtering antenna with ultra-wideband harmonic suppression [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(6): 661-667.

A Compact Filtering Antenna With Ultra-Wideband Harmonic Suppression

ZHANG Yudi, HAN Guorui*, WU Zijian, HAN Liping, CHEN Xinwei, YUAN Hao

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A compact filtering antenna with ultra-wideband harmonic suppression is proposed, using the aperture-coupled feeding. In order to improve the selectivity of the passband edge, the rectangular parasitic patch with capacitive loading is placed on both sides of the square radiation patch, the split rectangular loop is etched on the ground, and two nulls are beside the passband. In order to achieve an ultra-wideband harm suppression, a planar coupling structure is loaded on the feedline to generate a wide stopband from 4~18 GHz, an H-shaped slot etched on the size-reduced ground forms defected ground structure (DGS) to enhance the suppression bandwidth. The antenna has an overall size of 40 mm×35 mm×2.4 mm. The impedance bandwidth of the antenna is 3.35~3.6 GHz (7.1%). The upper and lower selectivity is 94 dB/GHz and 54 dB/GHz, respectively. The reflection coefficient of the antenna is greater than -3 dB in 4~23.48 GHz (6.7 f_0 , f_0 is the center frequency)

Key words: harmonic suppression; radiation nulls; filtering antenna; defected ground structure

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071282, 61771295); 山西省自然科学基金资助项目(201901D111027, 202203021211295, 202303021221072); 山西省归国留学人员科研资助项目(2021-006); 山西省研究生科研创新资助项目(2024SJ020)

作者简介: 张玉笛(2000-), 女, 硕士生, 主要从事微带天线和射频电路设计等研究。E-mail: 1773791695@qq.com。

* 通信作者: 韩国瑞(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要从事微带天线以及射频通信研究。E-mail: han_gr@sxu.edu.cn。

0 引言

5G技术的快速发展与普及,对无线通信系统性能,特别是频谱效率与信号质量的要求日益提高,中国电信所选用的n78频段为5G网络提供了广阔的频谱资源。但随着越来越多的通信频段被使用在不同的领域,频谱效率不断提高的同时也带来了新的挑战,即相近频段的设备之间极易产生干扰。滤波器和天线作为射频前端的两个关键器件,通常是独立设计的,通过额外的传输线级联来抑制谐波与杂散波,但这不易实现集成化与小型化。因此,对于既有滤波特性又可以抑制谐波的滤波天线进行研究具有重要意义。

滤波天线的功能主要分为对近通带信号的滤除和对远通带信号的滤除。对近通带信号的滤波可以通过刻蚀缝隙、加载寄生贴片、引入枝节等方式引入辐射零点,提高天线通带边缘的频率选择性。如诸葛琪皓等^[1]通过在贴片和接地板上蚀刻缝隙与开口环产生了两个辐射零点;Chen等^[2]通过引入寄生贴片构建多条耦合路径和改良的复合左右手微带线馈电,产生多个辐射零点;Liu等^[3]通过在馈线上引入枝节和多径耦合的方法,产生了两个辐射零点。对远通带信号的滤波即为谐波抑制,可以通过电磁带隙技术、加载带阻滤波器、引入枝节等方法实现。Lima等^[4]中采用电磁带隙技术与分形分布相结合的方法抑制二次谐波;通过在馈线上加载带阻滤波器,可抑制至三次谐波以上^[5-8];Zang等^[9]在偶极子天线的基础上加载枝节、刻蚀U形槽以及引入寄生贴片,最终达到了6倍频的抑制带宽;Chen等^[10]通过阶跃阻抗谐振器与开路枝节,实现了7.86倍频的超宽带谐波抑制。此外,还有对近、远通带同时滤波的研究。Sun等^[11]通过在天线的辐射体上刻蚀缝隙和接地板上刻蚀U形槽,提高了天线近通带的选择性,通过在馈线上加载 π 形枝节达到了2.84倍频的谐波抑制;Ren等^[12]利用贴片上的宽矩形槽和短路通孔

提高了近通带的选择性,通过调整馈电位置抑制不必要的高阶模,谐波抑制性能达到2.7倍频;Chu等^[13]利用T形微带馈线与平行条带建立多径耦合,产生了两个辐射零点,通过对圆形贴片进行模式分析实现了3.2倍频的谐波抑制。

本文设计了一款结构紧凑的可抑制超宽带谐波的滤波天线,实现了对近、远通带同时滤波的功能。通过在方形辐射贴片两侧放置带有容性负载的矩形寄生贴片,以及在接地板上刻蚀开口矩形环,分别在上下边带引入了一个辐射零点;通过在馈线上加载平面耦合滤波结构、在接地板上刻蚀H形缝隙并减小接地板尺寸形成了缺陷地结构,实现6倍以上的宽阻带抑制,所设计的天线尺寸为 $40\text{ mm}\times 35\text{ mm}\times 2.4\text{ mm}$ 。

1 超宽带谐波抑制滤波天线的设计

1.1 滤波天线结构

超宽带谐波抑制滤波天线整体结构如图1所示。该天线采用口径耦合馈电的方式,由两层介质基板组成,如图1(a)所示。一个边长为 w_1 的方形辐射贴片与两个长为 l_2 、宽为 w_2 的矩形寄生贴片印刷在上层介质基板的上表面。两个矩形寄生贴片沿y轴对称分布在方形辐射贴片两侧,并分别刻蚀了两个宽度为 l_3 的矩形槽,每个槽上分别连接了一个大小为C的容性负载,如图1(b)所示。长为l、宽为w的接地板位于下层介质基板的上表面,中心位置刻蚀了一个长为 l_4 、宽为 w_4 的矩形缝隙,用于激励辐射贴片。围绕矩形缝隙刻蚀了一个长为 l_8 、宽为 w_3 的开口矩形环,开口大小为 w_5 。接地板底部刻蚀了一个H形缝隙,形成缺陷地结构,如图1(c)所示。加载平面耦合滤波结构的 $50\ \Omega$ 馈线印刷在下层介质基板的下表面,如图1(d)所示。介质基板选用相对介电常数为4.4,厚度为h,介质损耗角正切为0.02的FR4材料。天线各部分的尺寸参数如表1所示。

表1 天线各部分的尺寸

Tab. 1 Dimensions of the proposed antenna

参数	l	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9
数值/mm	35	31.4	21.2	0.4	1	4	1.3	1	12	23
参数	l_{10}	l_{11}	l_{12}	w	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
数值/mm	1.5	40	2.7	40	15.5	5.5	15	11	6	0.2
参数	w_7	w_8	w_9	w_{10}	w_{11}	w_{12}	w_{13}	h		
数值/mm	2	4	1.8	3	3	2	5.6	1.2		

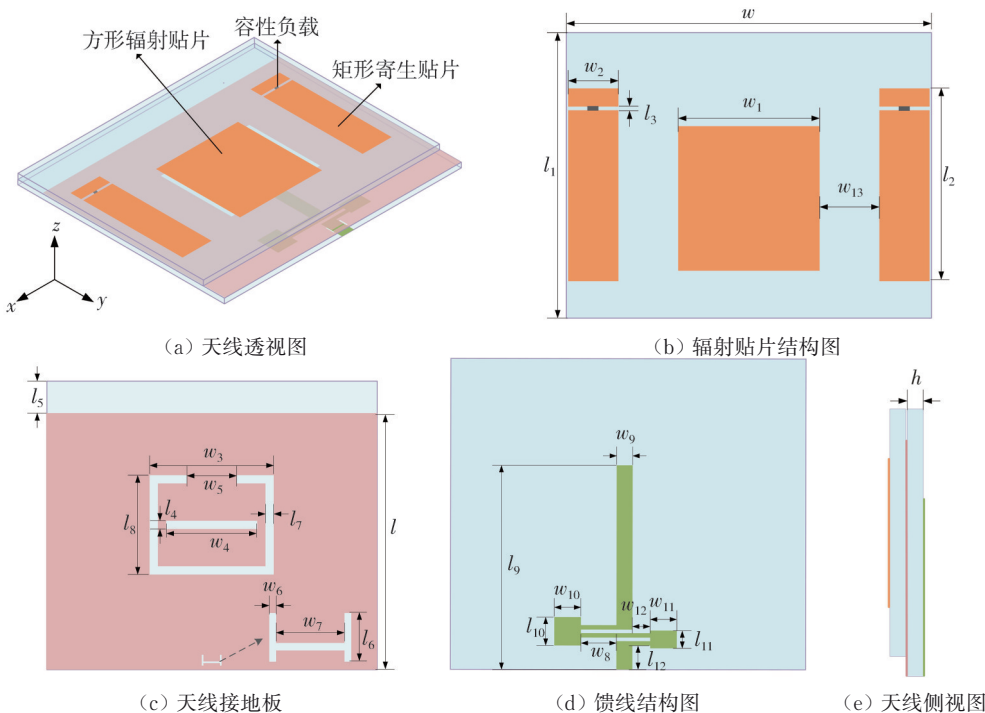


图1 天线结构

Fig. 1 Structure of the proposed antenna

该天线的设计过程分为4个步骤来展示, 分别是天线1、天线2、天线3与所设计的天线, 如图2所示。天线1为传统口径耦合馈电天线; 天线2在天线1的基础上引入了矩形寄生贴片和开

口矩形环; 天线3在天线2的基础上, 在馈线上加载了平面耦合滤波结构; 最终所设计的天线在天线3的基础上, 在接地板上刻蚀了H形缝隙, 并适当减小了接地板的尺寸。

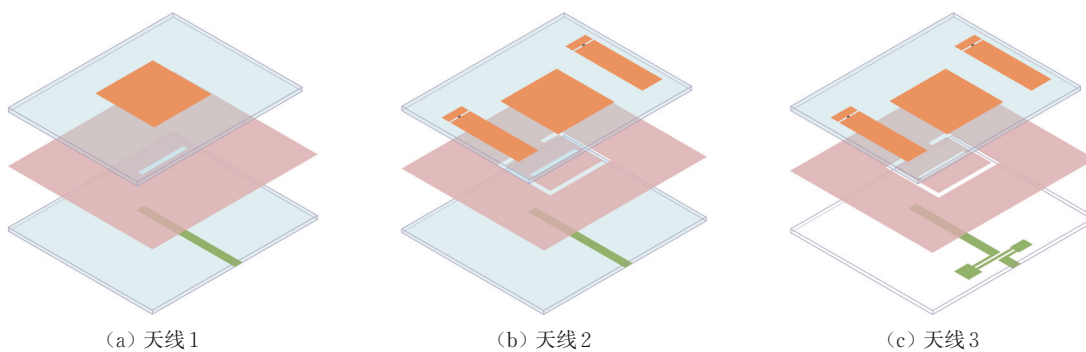


图2 天线设计过程

Fig. 2 Evolution of the proposed antenna

1.2 近通带滤波特性设计

图3对比了天线1与天线2的反射系数与增益。从图中可以看出, 增加矩形寄生贴片后, 天线的带宽由2.3%增加至6.3%, 且在3.66 GHz处引入了一个辐射零点; 接地板上刻蚀开口矩形环在3.06 GHz处又引入了一个辐射零点。

图4为3.46 GHz与3.66 GHz时的方形辐射贴片与矩形寄生贴片上的电流分布。从图中可以看出, 在3.46 GHz时, 天线工作在TM₁₀模式,

此时方形辐射贴片与矩形寄生贴片上的电流方向相同; 在3.66 GHz时, 方形辐射贴片与矩形寄生贴片上的电流幅度降低, 两者电流大小相等, 方向相反, 产生了上边带的辐射零点。

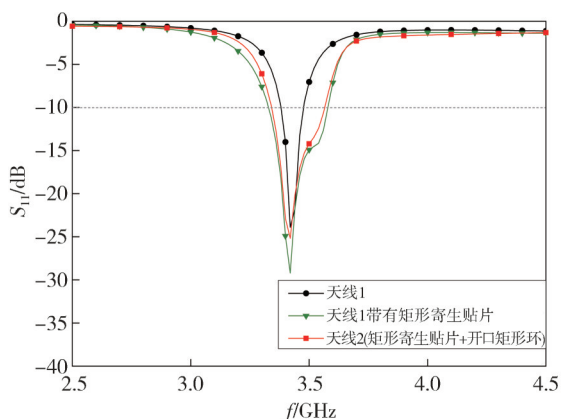
图5为3.46 GHz与3.06 GHz时的接地板上的电流分布。从图中可以看出, 在3.46 GHz时开口矩形环内外两侧的电流同向, 此时天线可以正常辐射; 在3.06 GHz时, 开口矩形环内外两侧的电流反向, 相互抵消, 形成了下边带的辐射零点。

图6为容性负载C对反射系数与增益的影响。

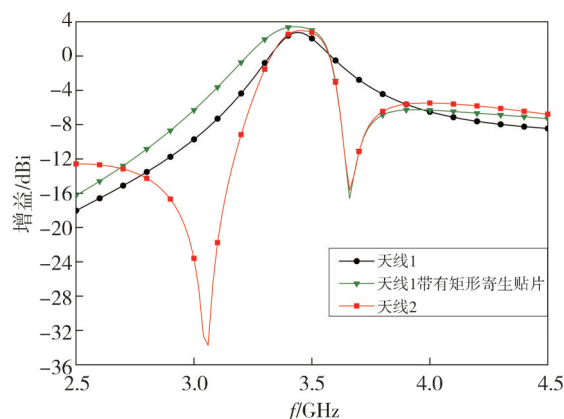
从图中可以看出,随着 C 的增大,上边带辐射零点向低频段移动,对下边带辐射零点几乎无影响;但当 C 为 2 pF 时,带宽变窄,故选择 C 为 1 pF 。

图7为开口矩形环的尺寸 l_8 对反射系数与增

益的影响。从图中可以看出,随着 l_8 的减小,下边带辐射零点向高频段移动,对上边带辐射零点几乎无影响;但当 l_8 为 10 mm 时,带宽变窄,故选择 l_8 为 12 mm 。



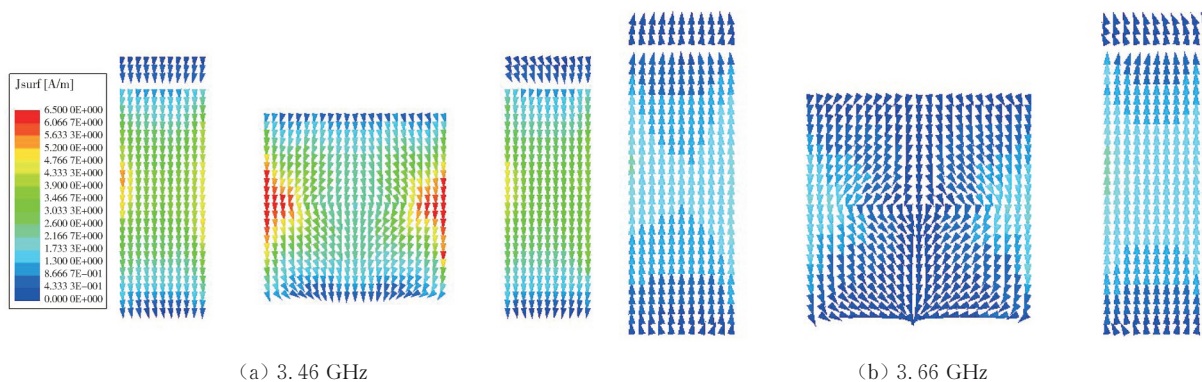
(a) 反射系数



(b) 增益

图3 天线1与天线2的反射系数与增益

Fig. 3 Reflection coefficient and gain of the antenna 1 and antenna 2

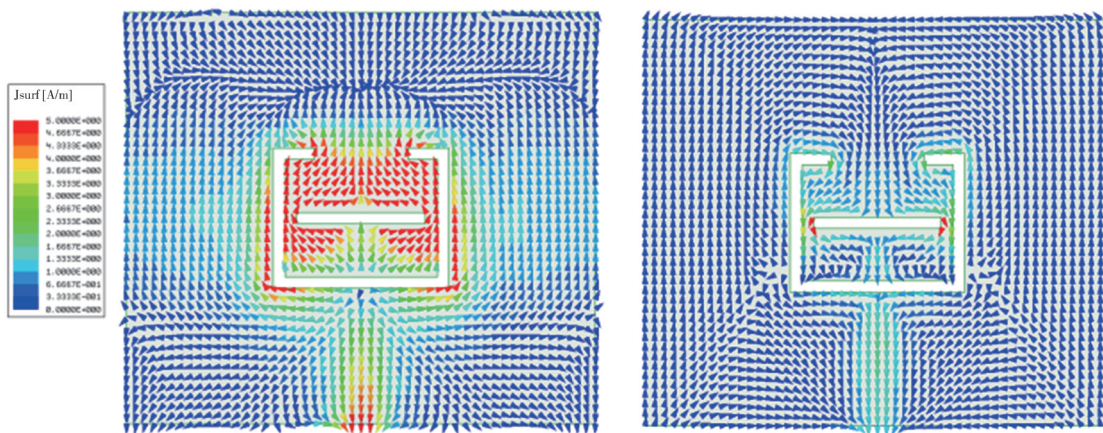


(a) 3.46 GHz

(b) 3.66 GHz

图4 天线2在3.46 GHz与3.66 GHz时的电流分布

Fig. 4 Current distribution at 3.46 GHz and 3.66 GHz of the antenna 2



(a) 3.46 GHz

(b) 3.06 GHz

图5 天线2在3.46 GHz与3.06 GHz时的电流分布

Fig. 5 Current distribution at 3.46 GHz and 3.06 GHz of the antenna 2

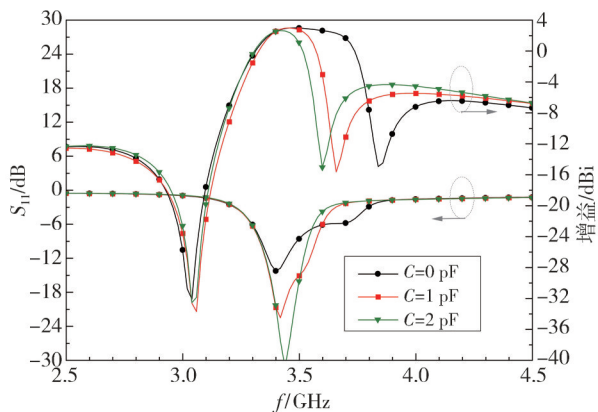


图 6 容性负载 C 对反射系数与增益的影响

Fig. 6 The effect of capacitive loading C on reflection coefficient and gain

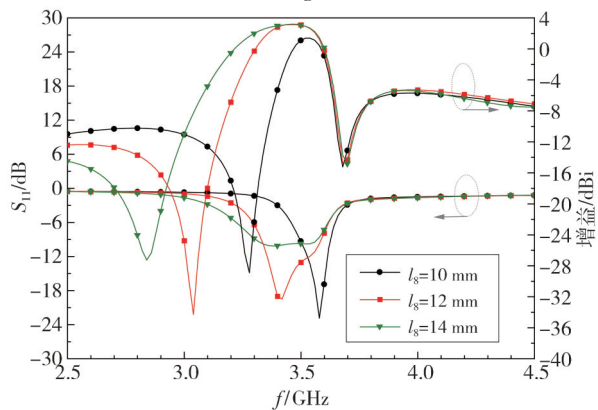


图 7 l_8 对反射系数与增益的影响

Fig. 7 The effect of length l_8 on reflection coefficient and gain

1.3 抑制超宽带谐波特性设计

图 8 对比了天线 2、天线 3 及所设计天线的反射系数。

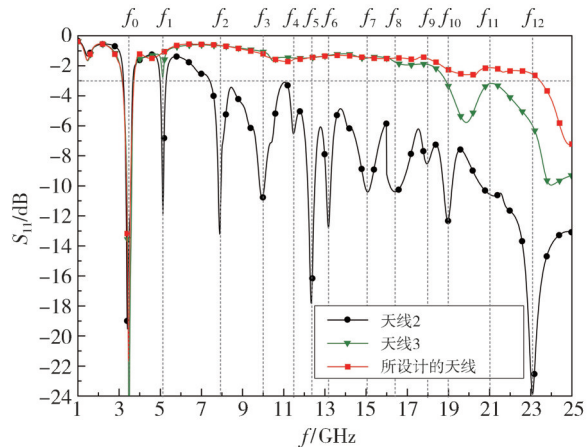


图 8 天线 2、天线 3 及至所设计的天线的反射系数

Fig. 8 Reflection coefficient of the antenna 2, 3 and proposed antenna

从图 8 中可以看出,除了所需的工作频率 f_0 外,天线 2 在 25 GHz 内产生了 12 个谐波与杂散波

($f_1 \sim f_{12}$); 天线 3 在加载平面耦合滤波结构后,可以抑制 4~18 GHz 范围内的谐波与杂散波,反射系数达到 -3 dB 以上;通过在接地板上刻蚀 H 形缝隙并减小接地板尺寸,最终设计的天线将抑制带宽拓展至 23.48 GHz。

为了更好地解释平面耦合滤波结构的抑制原理,图 9 对比了天线 2 和天线 3 在不同频点处的电场分布。从图 9 可看出,在 f_0 处天线 2 与天线 3 工作在 TM_{10} 模式,电场主要分布在方形辐射贴片和矩形寄生贴片上。在 f_2, f_4, f_7 频点处,天线 2 的电场主要分布在方形辐射贴片上,而天线 3 的电场强度很弱,无能量向外辐射,谐波与杂散波辐射被成功抑制, $f_1 \sim f_9$ 中其余频点抑制情况与之类似。但在 $f_{10} \sim f_{12}$ 频点处,天线 3 的电场强度仍较大,在 18~23.48 GHz 范围内的谐波与杂散波没有得到有效抑制。

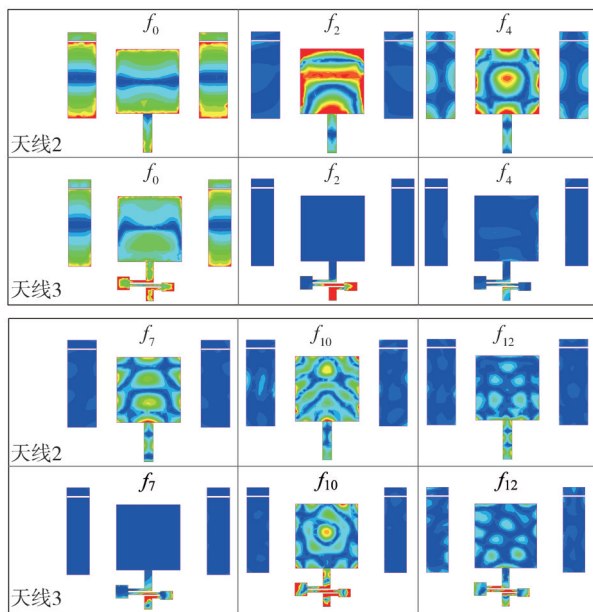


图 9 天线 2 与天线 3 在不同频点处电场强度分布

Fig. 9 E-field distribution of the antenna 2 and antenna 3 at the different frequency

图 10 为增加 H 形缝隙后在 f_{10} 处的电场分布,可以看出此时的电场集中在所刻蚀的 H 形缝隙上,辐射贴片上的电场强度很弱,该频率处的谐波被很好得抑制掉了。

不同的接地板尺寸也会影响天线的反射系数,图 11 为接地板减小的尺寸 l_5 对反射系数的影响。从图中可以看出,当 l_5 为 2 mm 时,可抑制至 21.3 GHz; 当 l_5 为 6 mm 时,可抑制至 22.34 GHz; 当 l_5 为 4 mm 时,可抑制至 23.48 GHz, 达到 6.7 倍频的谐波抑制。

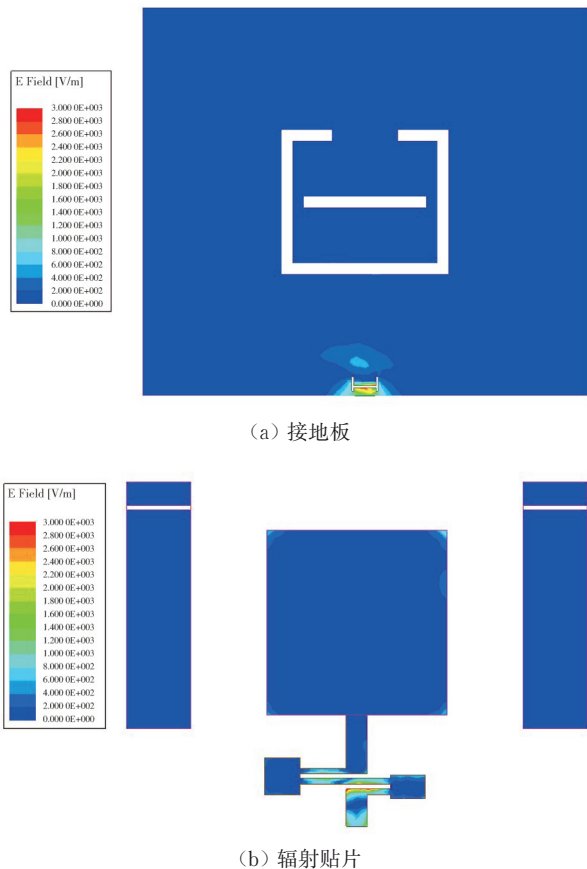


图 10 增加H型缝隙后在 f_{10} 处的电场分布

Fig. 10 E-field distribution at f_{10} after etching H slot

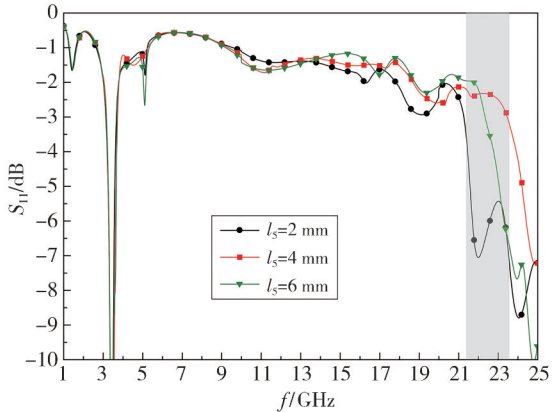


图 11 l_5 对反射系数的影响

Fig. 11 The effect of length l_5 on the reflection coefficient

2 仿真与测试结果

对设计的可抑制超宽带谐波的滤波天线进行了加工和测量。图 12 为天线的加工实物图,天线的整体尺寸为 $40\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$ 。

图 13 为天线仿真和测量的反射系数与增益。由图可知,仿真的 -10 dB 阻抗带宽为 $3.35 \sim 3.57\text{ GHz}$ (6.3%),在 $4 \sim 23.48\text{ GHz}$ ($6.7 f_0$, f_0 为

天线的中心频率)间的反射系数均大于 -3 dB ;测量的阻抗带宽为 $3.35 \sim 3.6\text{ GHz}$ (7.1%),可以工作在中国电信 n78 频段 ($3.4 \sim 3.5\text{ GHz}$),除 $17.5 \sim 22\text{ GHz}$ 频段内的 S_{11} 略小于 -3 dB ,在 $4 \sim 25\text{ GHz}$ 频段内的反射系数均大于 -3 dB ,此测量结果与仿真结果的差异主要源于天线的介电常数偏差以及加工误差。

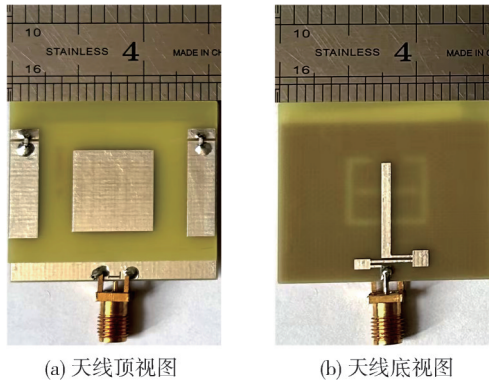
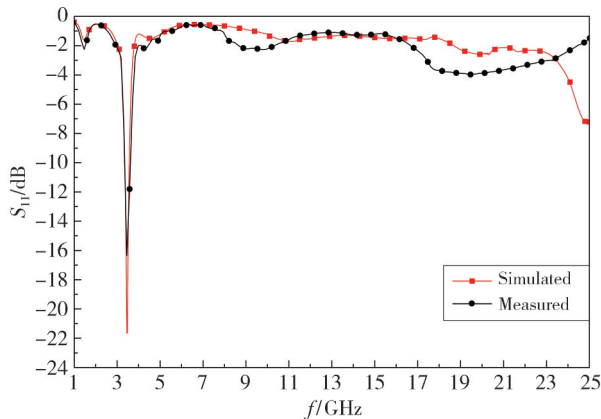
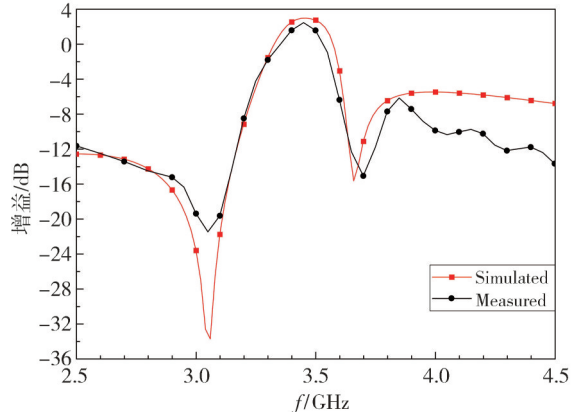


图 12 天线的加工实物图

Fig. 12 The physical picture of the proposed antenna



(a) 反射系数



(b) 增益

图 13 天线的反射系数与增益

Fig. 13 The reflection coefficient and gain of the proposed antenna

图 14 为天线在 3.46 GHz 的归一化辐射方向图。从图中可以看出,天线仿真的 $x-z$ 面辐射方

向图近似于全向辐射。测量与仿真结果基本一致,测量的交叉极化小于-15 dB,具有全向辐射

特性和较低的交叉极化,所测量的天线在背向辐射出现波纹,可能是天线接地板有限导致的。

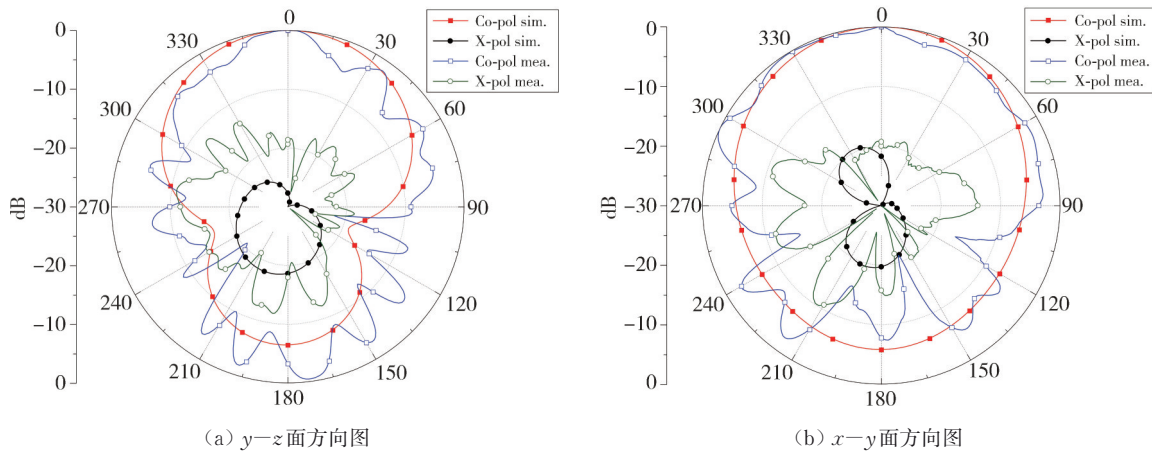


图 14 天线在 3.46 GHz 处的辐射方向图

Fig. 14 Radiation pattern of the proposed antenna at 3.46 GHz

表 2 给出了本文与和文献报道的谐波抑制滤波天线的性能比较。本文实现了对近、远通带同时进行滤波的功能。与文献[11]、[13]所设计的

谐波抑制滤波天线相比,本文所提出的天线达到 6.7 倍的超宽带谐波抑制。

表 2 天线性能的比较

Tab. 2 Antenna performance comparison

参考文献	天线尺寸/ (λ_0^3)	滤波性能	低频和高频边带滚降度/ $(\text{dB}\cdot\text{GHz}^{-1})$	抑制倍频数
[2]	$0.4 \times 0.4 \times 0.09$	有	110/74	0
[7]	$0.65 \times 0.65 \times 0.04$	无	0	4
[10]	$0.44 \times 0.59 \times 0.01$	无	0	7.86
[11]	$0.59 \times 0.59 \times 0.03$	有	—	2.84
[13]	$0.53 \times 0.51 \times 0.05$	有	—	3.2
本文	$0.46 \times 0.4 \times 0.02$	有	54/94	6.7

注:边带滚降度的计算可通过公式 $|R_{\text{max}} - R_{\text{min}}|/|f_{\text{max}} - f_{\text{min}}|$ 得出, R_{max} 为最大增益减少 20 dB 时对应的值, R_{min} 为最大增益减少 3 dB 时对应的值, f_{max} 和 f_{min} 分别为 R_{max} 和 R_{min} 对应的频率点,且边带滚降度的值越大意味着选择性越高。

3 结 论

本文设计了一种结构紧凑的可抑制超宽带谐波的滤波天线。通过在方形辐射贴片两侧放置矩形寄生贴片以及在接地板上刻蚀开口矩形环,分别在 3.06 GHz 处和 3.66 GHz 处引入了一个辐射零点,上下边带的滚降度分别达到了 94 dB/GHz 和 54 dB/GHz,提高了天线通带的选择性。通过在馈线上加载平面耦合滤波结构、在接地板上刻蚀 H 形缝隙并减小接地板尺寸,实现了 6.7 倍频的谐波抑制。天线的工作频带为 3.35~3.6 GHz,相对带宽为 7.1%,在 4~23.48 GHz 间的反射系数均大于 -3 dB。所设计的天线可应用于中国电信 n78 频段(3.4~3.5 GHz)。

参考文献:

[1] 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)

[2] CHEN B J, YANG X S, WANG B Z. A compact high-selectivity wideband filtering antenna with multipath coupling structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(8): 1654-1658.

(下转第 677 页)