

具有三陷波特性的紧凑型超宽带天线设计

龙秀天¹ 杨立成¹
LONG Xiutian YANG Licheng

摘要

为了适应工程需要,文章设计了一种尺寸小、陷波个数多、易于调谐的超宽带天线。该天线尺寸为32 mm×28 mm×0.8 mm,通过在矩形贴片上凿刻一个缺口椭圆形窄缝隙,又在矩形馈线两边加入U型谐振结构,经过结构之间的互耦特性得到三个性能良好的陷波。该天线覆盖频带为3~12 GHz,可以滤除C波段(4.85~5.04 GHz)(5.67~5.87 GHz)和Ku波段(6.76~6.90 GHz)的干扰。通过大量仿真及与近期研究做对比,所设计的天线在性能、结构和工程适应性方面均具有显著优势。

关键词

超宽带天线;三陷波;缺口椭圆窄缝隙;U形枝节

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.04.010

0 引言

超宽带天线是一种专为超宽带信号传输而设计的收发装置^[1]。作为超宽带系统的核心组件,其性能直接影响通信质量,这使得相关研究具有重要价值^[2]。超宽带技术凭借其显著优势,例如大信道容量、低功耗、经济性、强抗干扰能力、优异的多径抑制性能、出色的穿透能力以及高速传输特性,在多个领域获得广泛应用^[3],例如通信系统、雷达设备、医疗仪器、定位服务和成像技术等。

许多学者利用各种方法设计天线,希望在扩大带宽范围的同时尽量增加陷波特性的来抑制传输干扰。增加陷波特性的方法有开槽法^[4]、添加枝节法^[5]和寄生单元法^[6]等。其中添加枝节法最容易实现在基础天线结构上产生额外陷波特性的,因此被广泛使用。文献[7]通过对矩形辐射贴片切角,扩大了天线带宽的覆盖范围。文献[8]在原始天线基础上添加一对四分之一圆弧形结构扩展了天线的轴比带宽。文献[9]运用类似文献[7]的方法对偶极子天线本身进行切角操作扩展带宽,后续通过加载两个长短不一的寄生偶极子谐振结构以及开槽来创造新的特征模式。文献[10]的馈电结构是共面波导,将四个结构交叉放置,再将接地板蚀刻缺陷后加入十字隔离枝节,实现单陷波。文献[11]和文献[12]分别采用圆环型和扇形圆环谐振器实现双陷波。文献[13]在水杯形辐射贴片上凿刻C形槽,又切掉矩形接地板的三个角后凿刻U形窄缝隙,实现三陷波。文献[14]设计的贴片是半圆形结合矩形并进行切角处理,又在接地板蚀刻阶梯型结构。文献[15]在其砷砷型贴片上蚀刻带缺口的口字型槽,同时在接地板上蚀刻对称的L型槽,还在馈线两边放置U

型枝节。

以上研究中提出的天线设计方法在其频带范围内均表现出良好的阻抗特性和辐射方向图特性,但结构复杂且陷波数量少,不能很好地抑制多个干扰。此外,部分天线结构难以通过微调尺寸来调整陷波频率,从而难以满足实际工程应用中的需求,因此在应用于超宽带通信系统时存在一定的局限性。

为了设计出结构简单,频带覆盖范围广,陷波个数多且性能好的天线,本文特提出一种具有三陷波特性的超宽带天线结构。本文所设计的天线在矩形贴片上凿刻一个缺口椭圆形窄缝隙,并在馈线两边加入U型谐振结构,通过仿真得到该天线引入了3个良好的陷波性能,且陷波频带可以根据工程需要进行调节。

1 天线的结构与设计原理

从陷波结构设计原理可知通过开槽与添加枝节的方式可以使天线产生的陷波特性的,因此,本文首先通过矩形贴片和一条馈电线组合得到基本单极子天线,然后在贴片上蚀刻一个缺口椭圆形窄缝隙,如图1(a)。其次,在馈线两边增加U型谐振结构,如图1(b)(c),从而得到最终天线。

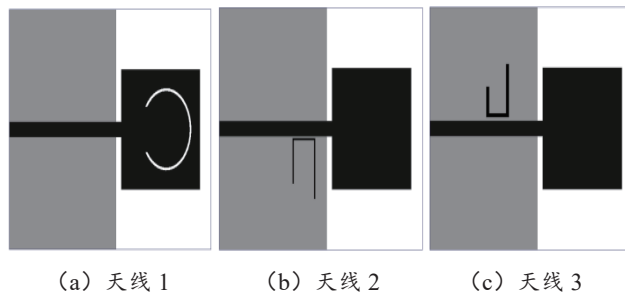


图1 天线设计过程

1. 贵州食品工程职业学院 贵州贵阳 550009

然而槽和枝节的尺寸如果设计不当,并不一定会使天线产生陷波特性的,要想通过加入谐振结构使天线产生陷波特性的,那么必须是半波长谐振结构^[16],其计算公式为:

$$L_r = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f_{\text{notch}}\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (1)$$

式中: L_r 为谐振结构的长度; λ_0 为自由空间波长; c 为自由空间光速; f_{notch} 为谐振频率; ϵ_r 为等效相对介电常数。

但式(1)只能估算出所添加谐振结构长度的近似值,想要获得良好的陷波特性的还要使用 HFSS 软件对所添加结构的长度进行仿真,得到最终所需的精确值。此外,调整谐振结构的宽度也会在相应频段产生陷波特性的。天线最终结构如图 2 所示,天线基板使用 Rogers 5880,基板厚度为 0.8 mm,介电常数为 2.2,损耗角正切为 0.000 9。

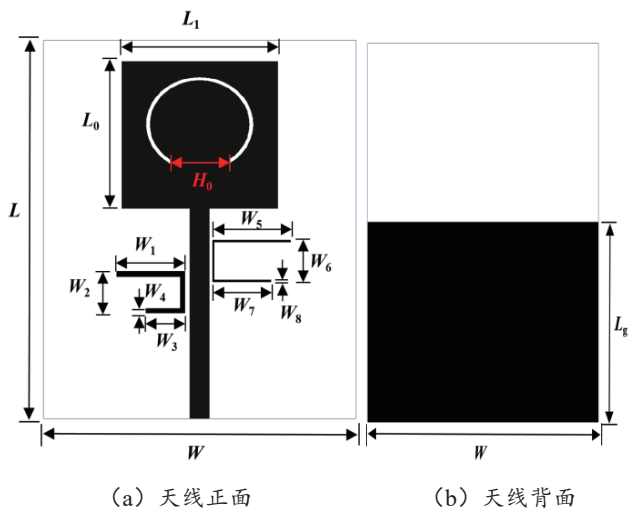


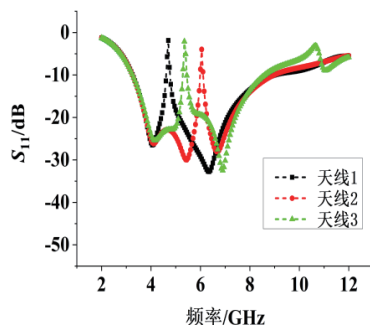
图 2 天线结构

天线的设计和优化均在 HFSS15.0 平台上进行,其参数值如表 1 所示。

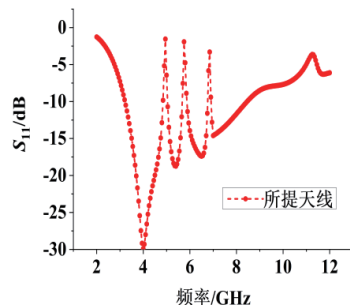
表 1 天线优化参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm
L	32	W_3	4
L_0	14	W_4	0.5
L_1	16	W_5	8
L_g	15	W_6	4
W	28	W_7	6
W_1	7	W_8	0.4
W_2	4	H_0	2

仿真结果如图 3 所示,由图 3(a)可知缺口椭圆形窄缝隙和馈线两边的 U 型枝节均单独对天线产生陷波特性的,最终该天线实现了如图 3(b)所示的三陷波特性的。



(a) 天线 1~3 的 S_{11} 曲线



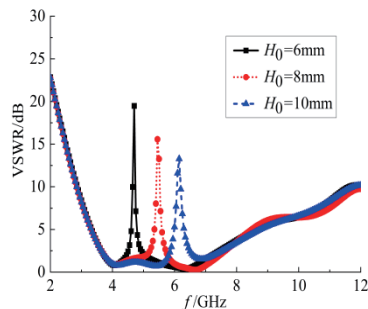
(b) 所提天线的 S_{11} 曲线

图 3 天线的反射系数 S_{11} 曲线

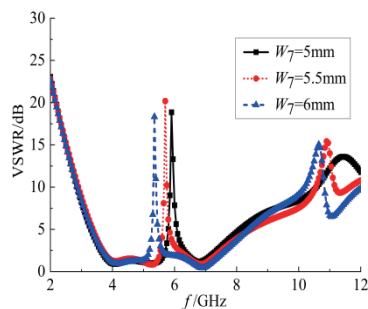
2 陷波特性的分析

2.1 中心频率调节性能

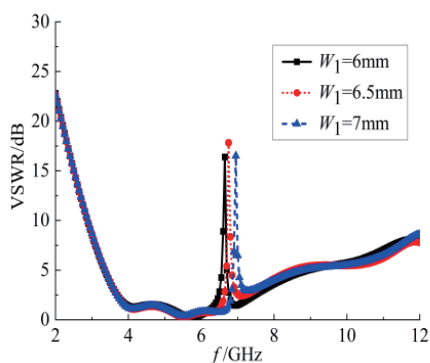
为了验证本文所设计的天线可以通过微调单个结构的尺寸来满足不同的工程需求,特调节椭圆窄缝隙的缺口大小 H_0 以及馈线两边 U 型谐振结构的长度 W_1 和 W_7 ,电压驻波比 VSWR 随 H_0 、 W_1 和 W_7 大小而变化的曲线仿真图如图 4 所示。



(a) H_0 变化对应的 VSWR 曲线



(b) W_7 变化对应的 VSWR 曲线



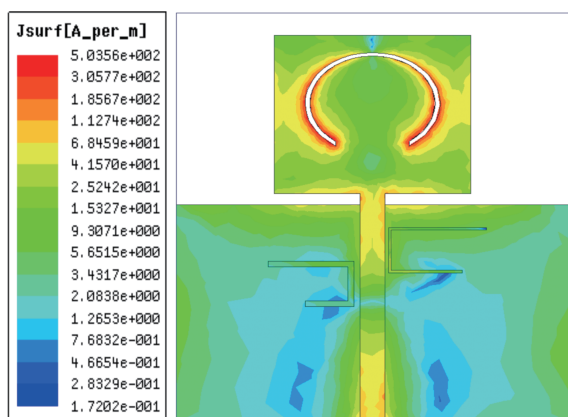
(c) W_1 变化对应的 VSWR 曲线

图 4 天线 VSWR 随 H_3 、 H_2 和 W_7 变化的曲线

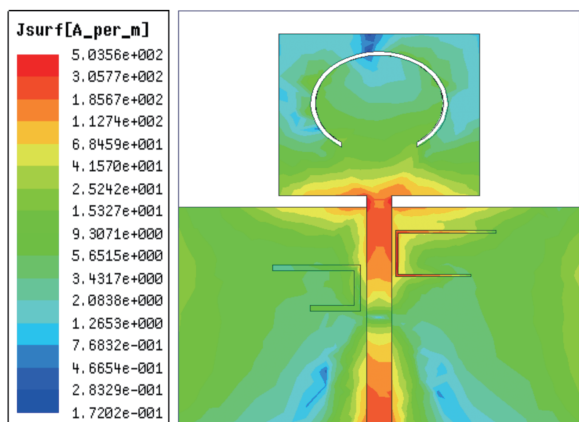
可以看出通过调节参数 H_3 、 W_1 和 W_7 的数值能改变其对应陷波的中心频率，天线的 VSWR 随椭圆窄缝隙缺口数值 H_0 增加，中心频率右移，随着馈线右边的 U 型谐振结构的长度数值 W_7 增加，中心频率左移，而随着馈线左边的 U 型谐振结构的长度数值 W_1 增加，中心频率右移。仿真证明本文所设计的天线具有结构易调谐的优点。

2.2 表面电流分布

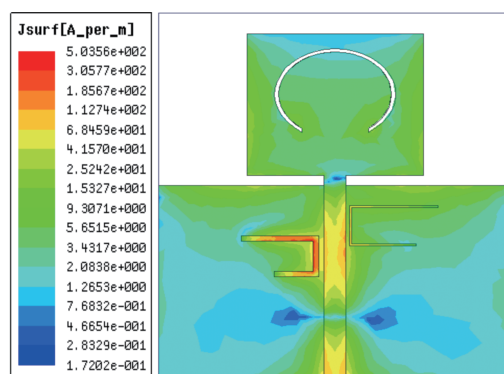
对天线的表面电流进行仿真分析可进一步解析陷波原理^[17]。结果如图 5 所示。



(a) 4.95 GHz



(b) 5.75 GHz



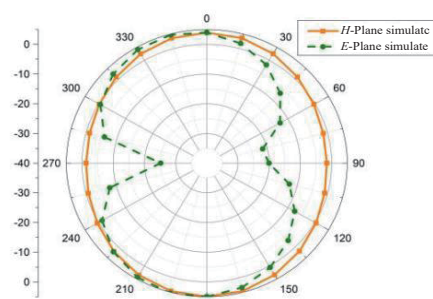
(c) 8 GHz

图 5 不同频率下的表面电流分布

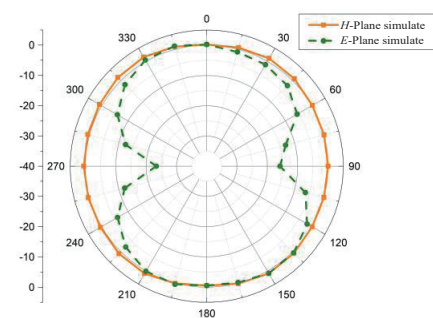
第一个陷波中心频率 4.95 GHz 处的表面电流主要集中在缺口椭圆形窄缝隙处；第二个陷波中心频率 5.75 GHz 处的表面电流主要分布在馈线和右边的 U 型谐振器处；第三个中心频率 8 GHz 处的表面电流均匀分布在馈线右边 U 型谐振结构周围。天线在这 3 个频率点附近产生较大的衰减和阻抗失配，从而形成陷波，抑制干扰。

3 天线性能分析

图 6 为 5.5 GHz 和 6.3 GHz 两个频率点的天线辐射 H 面、 E 面方向图。由天线的性能分析可知，若 H 面呈现圆形则代表该天线具有良好的圆极化特性，若 E 面为类“8”形则代表该天线在 E 面具有双瓣结构，可能为双极化或多端口馈电^[18]。从图 6 可看出，本文所设计的天线呈现近似的全向性以及较好的定向性。



(a) 5.5GHz



(b) 6.3 GHz

图 6 不同频率下的 E 面、 H 面辐射方向图

如表 2 所示,将本文所设计的天线与其他研究提出的天线在尺寸、频带、陷波个数及结构复杂度四个维度下进行对比,可以看出本文所设计的天线具有小尺寸、宽频带、结构简单且陷波结构多的优点。

表 2 本文所提天线与文献中天线对比

文献	尺寸/mm	频带/GHz	陷波	复杂度
个数	复杂度	2.46~10.6	1	简单
文献 [10]	65×65×0.8	2.46~10.6	1	简单
文献 [11]	异形	3.1~9.7	2	复杂
文献 [12]	异形	3.68~10.2	2	复杂
文献 [13]	33×30×1	2.7~14.0	3	复杂
本文	36×32×0.8	3.0~12	5	简单

4 结论

本文通过在矩形贴片上凿刻一个缺口椭圆形窄缝隙,又在矩形馈线两边加入 U 型谐振结构,经过结构之间的互耦特性得到三个性能良好的陷波。实现的 3 个陷波频段分别为 C 波段 (4.85~5.04 GHz) (5.67~5.87 GHz) 和 Ku 波段 (6.76~6.90 GHz)。为了验证所提天线的良好性能,本文还做了大量仿真工作,仿真表明所设计的天线不仅尺寸小、陷波个数多、结构简单,还易于调谐以适应工程需要。综上所述,该天线设计不仅在性能、结构、调谐性等方面表现出色,而且在无线通信系统、工程应用和学术研究等多个层面都具有重要意义。

参考文献:

[1] 杨春兰, 彭启航. 宽带天线研究与分析[J]. 中国宽带, 2025, 21 (4): 16-18.

[2] 李力, 曹群生, 赵海明, 等. 一种 L-Ku 波段的超宽带端射天线设计与研究[J]. 微波学报, 2024, 40(5): 85-90.

[3] 刘升光, 李宏升, 王真厚, 等. 无线通信设备的电磁辐射测量与分析[J]. 大学物理实验, 2024, 37(6): 1-6.

[4] BAO S H, REN W, ZENG Q Y, et al. An ultra-wideband multiple-input multiple-output antenna with dual band-notched characteristics[J/OL]. International journal of RF and microwave computer-aided engineering, 2021[2026-04-02]. <https://doi.org/10.1002/mmce.22979>.

[5] HAMMACHE B, MESSA A, MESSAOUDENE I, et al. Compact ultra-wideband slot antenna with three notched-band characteristics[J/OL]. International journal of RF and microwave computer-aided engineering, 2020[2026-04-02].

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mmce.22146>.

[6] WANG Z Q, LIU X L, RASOOL N, et al. Dual band-notched ultra-wideband antenna with T-shape stub[J/OL]. Electronics letters, 2022[2026-04-02]. <https://doi.org/10.1049/ell2.12602>.

[7] 宋梦欣, 孙学宏, 刘丽萍, 等. 单极子超宽带七陷波天线设计与研究[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(6): 25-28.

[8] 王树奇, 陈家乐. 基于临近耦合馈电的超宽带圆极化天线[J]. 半导体光电, 2025, 46(2): 307-312.

[9] 刘伟. 基于特征模分析的开槽超宽带偶极子天线设计[J]. 信息技术与信息化, 2025(5): 95-99.

[10] 张玲, 杜成珠, 胡鹏, 等. 超宽带单陷波四元 MIMO 天线的设计[J]. 压电与声光, 2024, 46(3): 392-398.

[11] 侯明, 周振羽, 李小珍, 等. 具有双陷波的超宽带滤波器设计[J]. 化工自动化及仪表, 2025, 52(1): 126-130.

[12] 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): 59-63.

[13] 李国金, 秦元龙, 南敬昌. 具有三陷波特性的新型超宽带天线设计与研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(11): 89-92.

[14] 南敬昌, 杨清淞, 彭力, 等. 具有四陷波特性的超宽带天线设计[J]. 磁性材料及器件, 2024, 55(4): 37-42.

[15] 廖银霜, 王代强. 一种五陷波超宽带天线的设计[J]. 电讯技术, 2021, 61(5): 640-645.

[16] 王致远, 杨福慧, 杜成珠, 等. 面向 5G 应用的超宽带 MIMO 天线设计[J]. 压电与声光, 2025, 47(1): 45-51.

[17] 董李静, 赵亮亮, 朱海亮, 等. 一款低剖面超宽带双极化的紧耦合天线设计[J]. 微波学报, 2024, 40(S1): 36-39.

[18] 苏晓莉, 刘桂凤, 韩国栋, 等. 超宽带低剖面天线设计[J]. 现代雷达, 2024, 46(9): 120-123.

【作者简介】

龙秀天 (1995—), 女, 贵州施秉人, 本科, 助教, 研究方向: 超宽带天线、阵列天线。

杨立成 (1992—), 男, 安徽涡阳人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 阵列天线、电磁计算。

(收稿日期: 2025-09-08 修回日期: 2026-04-09)