

一种基于 CSRR 结构的超宽带陷波天线设计

曾 裔 超¹, 张 厚¹, 闵 学 良¹, 陈 强¹, 龙 振 国²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 95392 部队, 广州, 510000)

摘要 设计了一款基于互补金属开口谐振环(CSRR)的具有陷波特性的超宽带天线。所设计的天线采用渐变式馈线,实现了较宽的阻抗匹配,并且通过在辐射贴片上刻蚀 2 个圆形开口缝隙来实现双陷波特性。天线尺寸为 35 mm×30 mm×1 mm。利用电磁仿真软件 HFSS 13.0 进行了仿真分析,根据仿真结果优化了设计;加工实物进行了测试,结果与仿真具有良好的一致性。仿真和测试结果表明天线在 2.7~15.6 GHz 的频段内电压驻波比(VSWR)小于 2,在 3.1~3.7 GHz、5.1~5.9 GHz 具有陷波特性,分别有效抑制了 WiMAX、WLAN 信号对超宽带通信系统的干扰。研究表明,该天线在除陷波频段外的其余超宽带工作频段范围内,具有良好的辐射方向性和稳定的增益,且结构紧凑,易于共形,能较好地应用于超宽带通信系统中。

关键词 金属互补开口谐振环(CSRR);超宽带(UWB);陷波

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.012

中图分类号 TN822⁺.8 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0066-05

Design of a Band-Notched Ultra-Wide Band Antenna Based on CSRR Structure

ZENG Yichao¹, ZHANG Hou¹, MIN Xueliang¹, CHEN Qiang¹, LONG Zhenguo²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Unit of 95392, Guangzhou 510000, China)

Abstract: A novel planar ultra-wide band (UWB) antenna based on complementary split-ring resonator (CSRR) structure with band-notched characteristics is proposed in the paper. The proposed antenna has a wide impedance matching characteristic with the gradual feeding line. By etching two split-ring slots on the patch, the dual band-notched characteristic is obtained. The fabricated antenna is tiny in size, only 35 mm×30 mm×1 mm. Simulation software HFSS 13.0 is used to analyze and optimize the structure parameters. The antenna is tested by physical measurement. The measured performance is of the same simulated results. The results show that the operating frequency band is within the range of 2.7~15.6 GHz, and the voltage standing wave ratio is lower than 2 ($VSWR < 2$); when the operating frequency band is within the range of 3.1~3.7 GHz and 5.1~5.9 GHz, there are good band-notched characteristics respectively in the bandwidth of WiMAX and WLAN. And there is a nearly directional radiation pattern and a stable gain. The antenna is compact and conformal, and can be applied to UWB communication system preferably.

Key words: complementary split-ring resonator (CSRR); ultra-wide band (UWB); band-notched characteristics

收稿日期: 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61601498)

作者简介: 曾裔超(1994—),男,四川乐山人,硕士生,主要从事天线与电磁兼容研究. E-mail:18729874867@163.com

引用格式: 曾裔超,张厚,闵学良,等.一种基于 CSRR 结构的超宽带陷波天线设计[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(3):66-70. ZENG Yichao, ZHANG Hou, MIN Xueliang, et al. Design of a Band-Notched Ultra-Wide Band Antenna Based on CSRR Structure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 66-70.

宽带天线^[1-2]可以完成信号发射、接收、检测等各种功能。超宽带天线于上世纪 60 年代提出,利用频谱极宽的超短脉冲进行通信,具有信号带宽大、传输速率快、结构简单、功耗低、隐蔽性好等优点,在通信领域一直是研究重点^[3-4]。

但超宽带频段覆盖的频段内也包括了全球互联接入 WiMAX(3.3~3.6 GHz),C 波段卫星通信(3.7~4.4 GHz),数字微波通信(4.3~4.5 GHz),以及无线局域网 WLAN(5.15~5.35 GHz,5.725~5.825 GHz)等。由于上述不同工作频段的无线通信的快速发展和广泛应用,频带资源愈加紧缺,因此催生了具有陷波特性的超宽带天线。自美国联邦通信委员会(FCC)将 3.1~10.6 GHz 定为民用超宽带通信频段以来^[5],国内外学者将研究重点转向了在特定频段具有陷波特性的超宽带天线^[6-8]。

在设计超宽带天线上,通常通过 3 种方式形成陷波^[4,9]:①在天线的地板上开槽或挖孔^[10-11];②在天线的介质基板上加载特殊形状的寄生枝节^[12-13];③在天线的辐射贴片上加缝^[14]。本文提出了一种基于互补金属开口谐振环(CSRR)的超宽带陷波天线。天线在 2.7~15.6 GHz 频段内电压驻波比(VSWR)小于 2,满足超宽带通信需求;采用了 CSRR 结构,使天线在 3.1~3.7 GHz、5.1~5.9 GHz 频段内实现较好的陷波特性。

1 天线设计

金属开口谐振环(SRR)结构是一种典型的左手结构^[15],经过周期性排列的 SRR 结构可实现左手材料的等效负磁导率,通过添加分支微带线和缝隙电容可以获得左手特性。此后 Yang 等人又将 SRR 结构应用于超宽带天线的研究中,文中提出的天线工作频率完全覆盖了 UWB 通信的频段^[16]。

本文采用的 CSRR 结构在谐振频率处有很好的陷波特性,等效电路见图 1。等效电路的电容 C_e ,由金属圆环和金属地产生;等效电路的并联电感,由内圆盘和金属地产生。本文利用 CSRR 结构的这种特性,在超宽带天线辐射贴片上加载了一个 CSRR 结构,实现了特定频段的陷波特性。

CSRR 结构尺寸与陷波特性之间的关系,满足以下经验公式:

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

式中: c 为光速; L_{total} 为 CSRR 环缝隙的长度; ϵ_r 为有效介电常数; f_{notch} 表示陷波中心频率。换算成圆环缝隙半径为 $R=L_{\text{total}}/2\pi$ 。

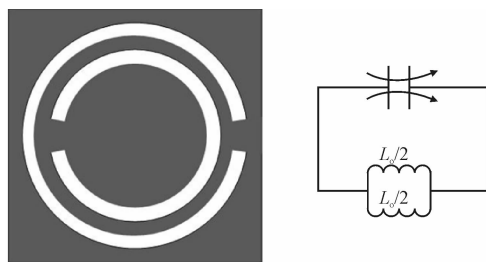


图 1 CSRR 结构图及其等效电路图

Fig.1 The structure and equivalent circuit of CSRR

本文提出的超宽带陷波天线结构见图 2。该天线采用渐变微带线和六边形辐射贴片。天线刻蚀在尺寸为 35 mm×30 mm、厚度 1 mm、相对介电常数 2.65 的聚四氟乙烯介质基板的一面,另一面为金属地板。为实现 50 Ω 的输入阻抗匹配,利用经验公式(2)计算出微带馈线的宽度为 $W_1=3$ mm。

$$Z_{0m} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(8 \frac{H}{W_1} + 0.25 \frac{W_1}{H} \right) \quad (2)$$

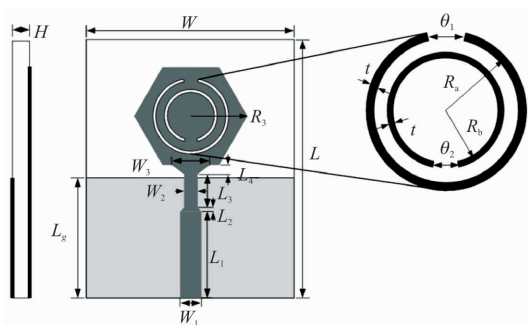


图 2 天线结构图

Fig.2 Structure of the antenna

2 仿真分析

为分析微带馈线结构对天线性能的影响,使用 HFSS 13.0 对比分析了不具有渐变结构的馈线(馈线为矩形,直接与六边形辐射贴片连接)与具有渐变结构的的天线性能,图 3 为仿真结果对比图。

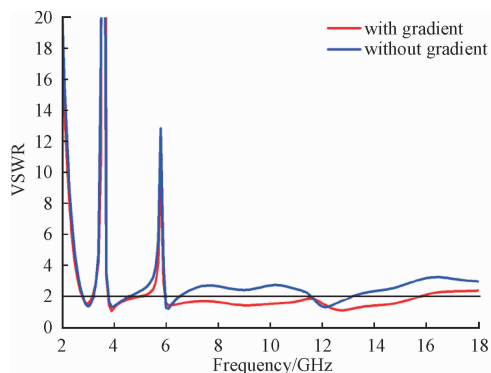


图 3 馈线具有与不具有渐变结构的 VSWR 值

Fig.3 VSWR with and without gradient

分析可得,渐变结构是产生超宽带特性的主要原因。从能量的角度分析,采用渐变结构,不会使电流集中,电抗性储能就会减小,天线带宽增加。

为分析 CSRR 结构尺寸对天线性能的影响,分别对比分析了 CSRR 结构中的内圆环与外圆环半径对天线性能的影响,见图 4~5。

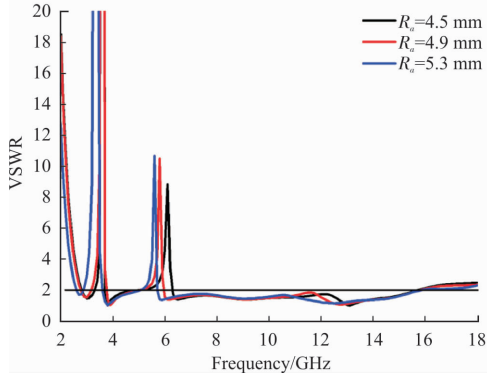


图 4 外圆环半径不同的 VSWR 值

Fig. 4 VSWR with different out-circle

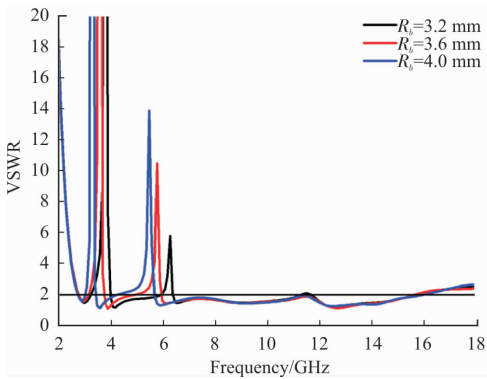


图 5 内圆环半径不同的 VSWR 值

Fig. 5 VSWR with different in-circle

由图 4 可以看出,改变外圆半径,将使天线在 WLAN 频段的陷波特性的变化。陷波中心频率随外圆半径增加而减小;由图 5 可以看出,内圆半径变化对 WLAN 频段和 WiMAX 频段的陷波特性的影响,随半径增大,陷波中心频率均减小。以上规律均符合公式(1)。

同理,天线其他结构参数的改变也会对天线性能有较大的影响,因此在仿真分析过程中,对天线尺寸进行优化设计,最终得到表 1 的天线尺寸。

表 1 天线尺寸

Tab. 1 The dimensions of the antenna mm, (°)

L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_g
35	12.3	0.5	4.9	1.3	16.9
W	W_1	W_2	W_3	H	t
30	3	2	5.6	1	0.4
θ_1	θ_2	R_1	R_a	R_b	
20	28	8	4.9	3.6	

图 6 描述了天线在 3 GHz、6 GHz、10 GHz 处 E 面和 H 面的仿真和实测辐射方向图。可见,天线 E 面辐射方向图是类似“8”字形,而 H 面辐射方向图表明此款天线具有近似全向的辐射特性。在高频部分出现了不规则的变形,但变化趋势较平坦,稳定性好,因此符合超宽带通信系统的要求。

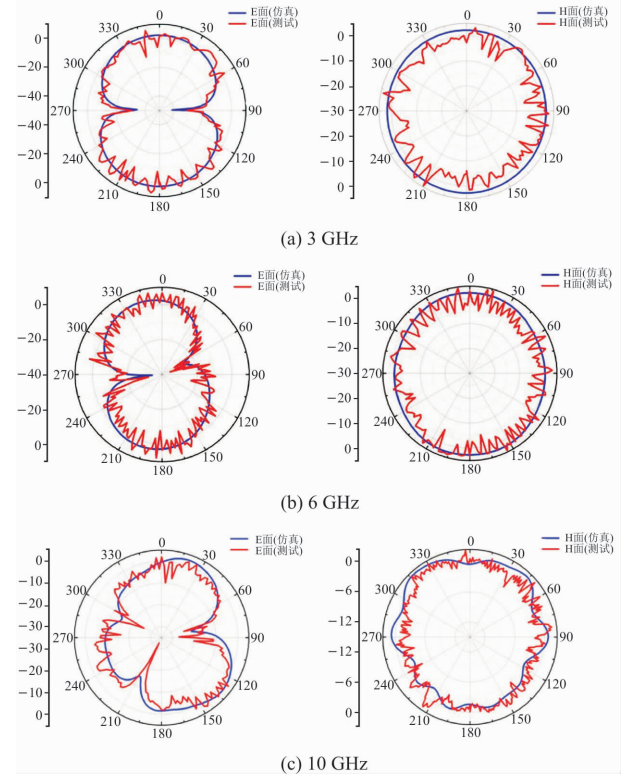


图 6 天线辐射方向图

Fig. 6 Patterns of the antenna

为更好地分析 CSRR 结构实现陷波特性的原理,对天线贴片结构的表面电流进行分析。图 7 是表面电流在陷波中心频率时的仿真结果。由图可以看出,天线在陷波频段内时,电流集中在 CSRR 结构附近,这说明能量都储存在 CSRR 结构上,没有被辐射出去,从而实现了陷波特性的。

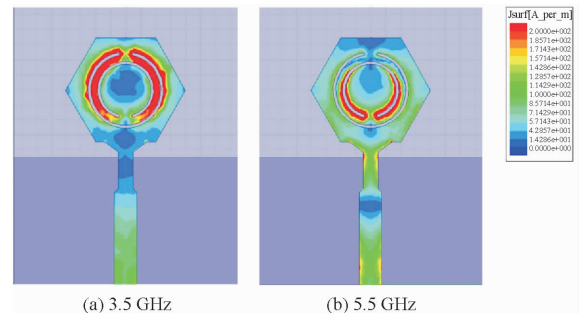


图 7 天线表面电流仿真结果

Fig. 7 Simulated result of surface current of the antenna

图 8 是天线在宽带频段内的增益仿真结果。由图可知,天线在工作频段曲线平坦,增益保持在 1~2 dB 之间,而在陷波频段天线增益下降至 -7.5 dB

和 -4.5 dB。表明天线具有良好的工作性能。

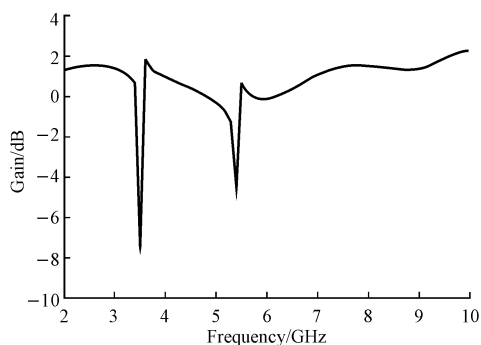


图 8 天线增益

Fig. 8 Gain of the antenna

图 9 是加工制作的天线实物图。为进一步验证此款天线的超宽带特性和陷波特性的,使用矢量网络分析仪对天线电压驻波比 VSWR 进行了实际测试,结果见图 10。仿真和测量结果存在偏差,天线的加工、SMA 接头的焊接以及介质基板的参数等,都可能是造成此类偏差的原因。

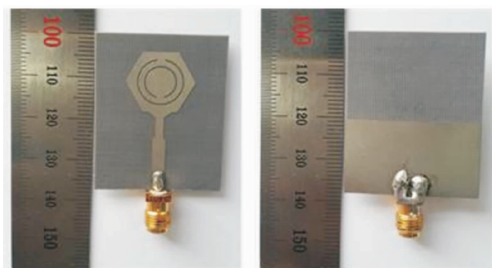


图 9 天线实物图

Fig. 9 Photograph of proposed antenna

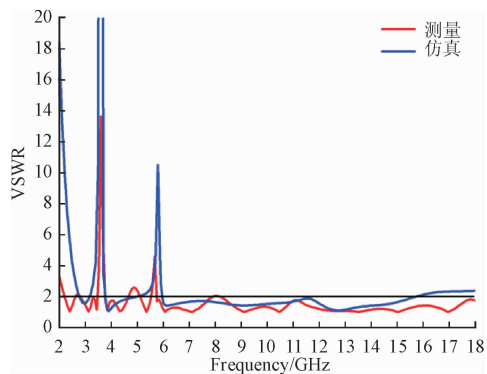


图 10 VSWR 仿真与测试结果对比

Fig. 10 Simulated and measured VSWR

3 结语

本文提出了一种基于 CSRR 结构的具有陷波特性的超宽带天线,仿真和实测均表明,该天线工作带宽为 $2.7 \sim 15.6$ GHz,完全满足超宽带通信的要求,并且实现了天线在 $3.1 \sim 3.7$ GHz、 $5.1 \sim 5.9$ GHz 频段上的陷波特性的,有效抑制了 WiMAX 和

WLAN 这 2 种通信系统信号对超宽带系统的干扰。天线阻抗匹配良好,同时保持了辐射方向图在 H 面的全向性和在 E 面的稳定性,是一款有较强应用价值的具有陷波特性的超宽带天线。

参考文献(References):

- [1] 胡来招. 宽带平面天线的设计和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 8.
HU L Z. Broadband Planar Antenna Design and Applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 8. (in Chinese)
- [2] 刘汉, 尹成友, 范启蒙. 超宽带天线的研究现状与展望 [J]. 电子元件与材料, 2016, 35(6): 8-15.
LIU H, YIN C Y, FAN Q M. Research Status and Prospect of UWB Antenna [J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(6): 8-15. (in Chinese)
- [3] 赵广雷, 龚龙艳. 具有双频带阻特性的超宽带天线的设计 [J]. 电子元件与材料, 2016, 35(3): 64-66.
ZHAO G L, GONG L Y. A Design of UWB Antenna with Double Band-Notched Characteristics [J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(03): 64-66. (in Chinese)
- [4] 沈菊鸿, 卢春兰, 曹文权, 等. 超宽带天线及其陷波技术的研究与进展 [J]. 军事通信技术, 2014, 35(3): 87-93.
SHEN J H, LU C L, CAO W Q, et al. Research and Progress of Ultra-Wideband Antennas and Their Band-Notched Techniques [J]. Journal of Military Communications Technology, 2014, 35(3): 87-93. (in Chinese)
- [5] Federal Communications Commission. First Report and Order in the Matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems [R]. ET-Docket, 2002: 98-153.
- [6] WANG Z Y, LIU J H, YIN Y Z. Triple Band-Notched UWB Antenna Using Novel Asymmetrical Resonators [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2016, 70(12): 1630-1636.
- [7] YANG H, CHEN J, et al. Design and Simulation of A Compact Ultra-Wideband Band-Pass 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.
- [8] TANG H L. A Design of Ultra Wide Band Antenna with Three Notch Characteristics [C]// Proceedings of 2017 2nd Joint International Mechanical Electronic and Information Technology Conference (JIMET 2017), 2017: 4.

- [9] ELSAGHEER R M. Study on Bandwidth Enhancement Techniques of Micro-Strip Antenna [J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2015.
- [10] BAKARIYA P S, DWARI S, SARKAR M. A Triple Band Notch Compact UWB Printed Monopole Antenna [J]. Wireless Pers Commun, 2015, 82: 1095-1106.
- [11] 高卫东, 刘汉, 孙荣辉. 一种新型缺陷地结构的双陷波超宽带天线 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(7): 1109-1113.
GAO W D, LIU H, SUN R H. A Double Band-Notched UWB Antenna with Novel DGS [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(7): 1109-1113. (in Chinese)
- [12] 吴爱婷, 官伯然. 一种具有三阻带特性的超宽带天线的设计与研究 [J]. 微波学报, 2015, 31(2): 15-19.
WU A T, GUAN B R. Design and Research of A Compact CPW-FED UWB Antenna with Triple Band-Notched Characteristic [J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(2): 15-19. (in Chinese)
- [13] KADAMA Bhushan V, GUDINO Lucy J. A Band-notched Ultra-wideband Compact Planar Monopole Antenna with U-shaped Parasitic Element [J]. Procedia Computer Science, 2016, 93: 101-107.
- [14] 翟岱亮, 张晨新, 李红梅, 等. 新型圆形共面波导双陷波超宽带天线设计 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(3): 50-53.
ZHAI D L, ZHANG C X, LI H M, et al. Design of a Novel CPW-FED Circular Disc Ultra-Wideband Antenna with Dual Band-Notched Characteristics [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2012, 13(3): 50-53. (in Chinese)
- [15] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [16] YANG X, YU Z, SHI Q, et al. Design of Novel Ultra-Wideband Antenna with Individual SRR [J]. Electronic Letters, 2008, 44(19): 1109-1110.
(编辑: 徐敏)

(上接第 53 页)

- [10] 高正娟, 曹茂盛, 朱静. 复合吸波材料等效电磁参数计算的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2004(4):12-14.
GAO Z J, CAO M S, ZHU J. Development in Study of Effective Electromagnetic Parameters of Absorbing Composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2004(4):12-14. (in Chinese)
- [11] 丁世敬, 葛德彪, 申宁. 复合介质等效电磁参数的数值研究[J]. 物理学报, 2010, 59(2):943-944.
DING S J, GE D B, SHEN N. Research on Effective Electromagnetic Parameters of Composite Media[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 943-944. (in Chinese)
- [12] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008:29-35.
WANG X. Principles of Aero-Electronic Warfare [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 29-35. (in Chinese)
- [13] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002:128-130.
- DING L F, GENG F L. Principle of Radar[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002: 128-130. (in Chinese)
- [14] SHERMAN W M. Electromagnetic Wave Propagation through Chaff Clouds[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(7): 2032-2042.
- [15] 李洋, 吴华, 王红卫, 等. 一种高效的有源照射箱条云复合干扰方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(4):39-43.
LI Y, WU H, WANG H W, et al. An Effective Compound Jamming Method Based on Radiation on Chaff Cloud[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(4): 39-43. (in Chinese)
- [16] JANŽ, MAREK V. Use of Different Chaff Materials During Electromagnetic Jamming Exercise[C]. IEEE Transactions on 26th Conference Radioelektronika, 2016: 189-192.
(编辑: 徐敏)