

基于左手材料的超宽带平面天线的设计

李顺利,曾文波,陈应辉

(广西科技大学 电气与信息工程学院,广西 柳州 545006)

摘要:设计了一种十字交叉耦合型结构的左手材料,左手材料构成的超宽带陷波滤波器通带范围为 3.16~11.84 GHz,陷波范围为 7.01~8.56 GHz。针对现有平面天线设计难、体积大和滤波性能低等问题,将左手材料的滤波器加载于两款结构简单、易于加工的平面天线上,构成基于左手材料的超宽带滤波天线。相比于现有平面天线,该滤波天线同时具有辐射和滤波功能。经 HFSS 软件仿真和计算得出该滤波天线工作在超宽带范围内,X 波段陷波处回波损耗可达 -1.30 dB,实现了超宽带天线集成化、小型化的设计。

关键词:左手材料;陷波滤波器;平面天线;超宽带;滤波天线

中图分类号:TN82 **文献标识码:**A

Design of Ultra Wide Band Planar Antenna Based on Left Handed Material

LI Shunli, ZENG Wenbo, CHEN Yinghui

(College of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: A kind of left-handed material (LHM) with the cross-coupled structure is designed in this work. A new type of ultra wide band (UWB) notch filter constructed by the proposed LHM has a pass-band of 3.16~11.84 GHz and a stop-band of 7.01~8.56 GHz. Aiming at the problems of difficult design, large size and low filtering performance existing in the planar antenna, an UWB filtering antenna based on LHM has been realized through loading the LHM filter onto two simple-structure and easy-to-fabrication planar antennas. Comparing with the conventional planar antenna, the proposed filter antenna has both radiation and filtering functions. The HFSS software simulation and calculation show that the filter antenna operates in the ultra wide band, the return loss at X band notch is up to -1.30 dB, which can realize the integration and miniaturization design of UWB antenna.

Key words: left handed materials; notch filter; planar antenna; ultra wide band; filter antenna

0 引言

左手材料是指电场(E)、磁场(H)和波矢量(K)在电磁波传播过程中满足左手定则的材料^[1]。与右手材料相比,左手材料具有逆多普勒效应、逆古斯-汉辛位移和完美透镜等奇异的物理现象^[2],且因其介电常数(ϵ)和磁导率(μ)都为负值,故左手材料又被称为超材料或双负介质^[3]。自美国联邦通信委员会(FCC)规范了超宽带频率范围为 3.10~10.60 GHz 以来,超宽带(UWB)天线的应用引起了人们的高度重视。超宽带频段内存在着其他窄带无线通信信号,如 X 波段(7.25~7.75 GHz, 7.9~8.4 GHz),为了避免窄带信号对超宽带天线产生电磁干扰,滤除超宽带波段中的窄带信号尤为必要^[4]。

随着无线通信技术的发展,对通讯设备尺寸及功能的要求逐渐提高,将多个器件集中设计在一个基板上,实现微波器件集成化、多功能、小型化的设计成为通信设备发展的主要趋势。近年来,许多具有滤波特性的天线结构被提出,文献[5]通过在准八木天线的馈电端引入滤波巴伦形成端射滤波天线,使得滤波天线结构紧凑,易集成;文献[6]采用具有缺陷接地结构(DGS)的扇形贴片天线代替预先设计的带通滤波器的第 2 个端口和第 2 个谐振器,形成通带内增益平坦的滤波天线;文献[7]将天线等效为滤波器的最后一阶谐振器和负载,设计了一款工作在 2.30~2.60 GHz 的滤波天线。本文将左手材料的超宽带陷波滤波器与结构简单的平面天线集成设

收稿日期:2016-07-27

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2015GXNSFAA139289);广西科技大学研究生创新基金资助项目(GKYC201621)

作者简介:李顺利(1991-),女,河南濮阳人,硕士生,主要从事天线设计及其优化的研究。通信作者:曾文波,教授,硕士生导师,主要从事平面天线的研究。E-mail:abc90175@163.com。

计于同一介质基板上,使其同时具有滤波和辐射的双重特性,与传统的通过改变天线形状使天线具有陷波的方法相比,此法使得矿下天线的陷波性能更稳定。

1 滤波器的设计

设计基于左手材料的超宽带陷波滤波器结构如图 1、2 所示。该滤波器由共面波导区段的金属板以及另一侧的一对高阻抗弯曲线组成十字交叉耦合性结构,此结构组成的滤波器具有左手特性,印刷在相对介电常数(ϵ_r)为 2.55、介质损耗角正切($\tan \delta$)为 0.001 9、厚为 0.8 mm 的 Taconic TLX(tm) 介质板上。

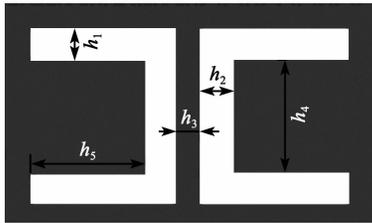


图 1 陷波滤波器正面

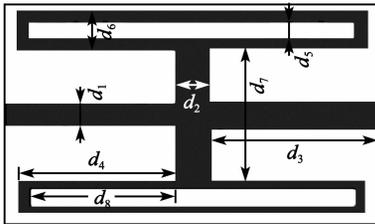


图 2 陷波滤波器反面

该超宽带陷波滤波器的尺寸为 7.2 mm × 15.8 mm,其他参数值为: $h_1=0.87$ mm, $h_2=1$ mm, $h_3=1$ mm, $h_4=3.2$ mm, $h_5=6$ mm; $d_1=0.6$ mm, $d_2=1$ mm, $d_3=7.4$ mm, $d_4=7$ mm, $d_5=0.5$ mm, $d_6=1.4$ mm, $d_7=3.2$ mm, $d_8=6.5$ mm。

在基于左手材料的超宽带陷波滤波器中,由面对面的耦合提供了左、右手传输线(CRLH)系列电容 C ,同时一对高阻抗十字曲线产生了 CRLH 系列的并联电感 L 。CRLH 模型的中心频率公式为

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{CR}\omega_{CL}} \quad (1)$$

其中

$$\omega_{CL} = \omega_L/2 \quad (2)$$

$$\omega_{CR} = \omega_R/2 \quad (3)$$

$$\omega_L = 1/\sqrt{L_L C_L} \quad (4)$$

$$\omega_R = 1/\sqrt{L_R C_R} \quad (5)$$

根据式(1),使用 HFSS 软件对滤波器进行优

化。由式(1)可知,对滤波器性能产生主要影响的参数为滤波器宽度 d_1 、反面宽度 d_2 、缝隙缺口宽度 h_3 和缝隙长度 h_5 。在其他参数保持不变的情况下,仅改变 d_1 、 d_2 、 h_1 和 h_3 中的 1 个数值。依次令 d_1 为 0.4 mm,0.6 mm,0.8 mm; d_2 依次取值为 0.5 mm,1 mm,2 mm; h_3 依次取值为 0.8 mm,1 mm,1.2 mm; h_5 取值为 5 mm,6 mm,7 mm。利用 HFSS 仿真可得陷波滤波器的插入损耗 S_{21} 曲线,如图 3~6 所示。

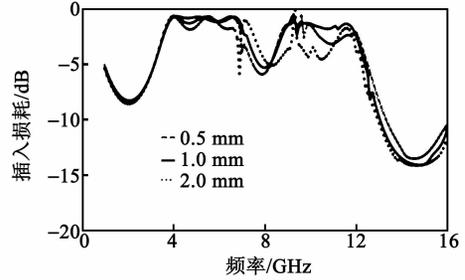


图 3 d_1

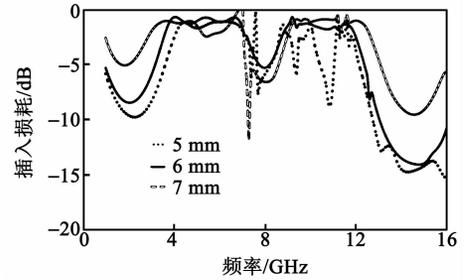


图 4 h_5

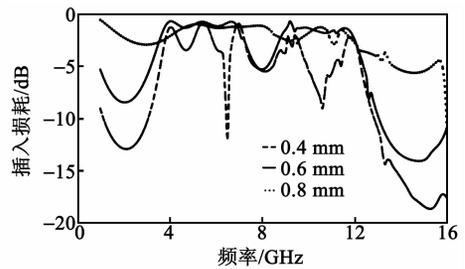


图 5 d_2

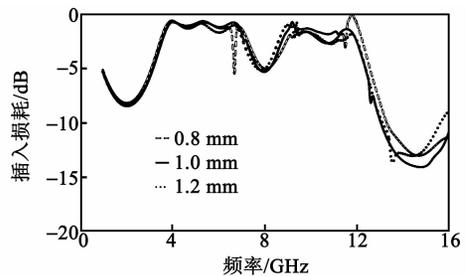


图 6 h_3

由图 3~6 可看出,随着 d_1 和 h_5 的不断变化,

滤波器的陷波范围和通带范围不断变化,但都会出现先增后减的趋势。根据超宽带的定义,通带最低频率应大于 3.1 GHz,因此选取 $d_1=0.6$ mm, $h_5=6$ mm; d_2 变化影响的是在通带范围一定时,滤波器陷波范围的大小。为了避免窄带信号 X 波段对超宽带信号产生的电磁干扰,选取 $d_1=1$ mm。随着 h_3 的增加,滤波器的性能逐渐增强;当 $h_3 > 1$ mm 时,通带范围随着 h_3 的增大而逐渐减小,因此,选取 $h_3=1$ mm。 d_1 能够影响滤波器性能的原因:滤波器反面十字宽度的改变影响了滤波器高阻抗值,从而影响电感; h_3 能够影响滤波器性能的原因:滤波器间距的改变影响了滤波器相互耦合的效率,从而影响电容,电感和电容的变化影响着滤波器带宽的范围^[8]。

使用 HFSS 软件仿真得到该滤波器的回波损耗 S_{11} 及插入损耗 S_{21} 曲线,如图 7 所示。由图可知,该滤波器通带范围为 3.16~11.84 GHz,陷波范围为 7.01~8.56 GHz,成功滤除了窄带信号 X 波段对超宽带信号产生的电磁干扰。

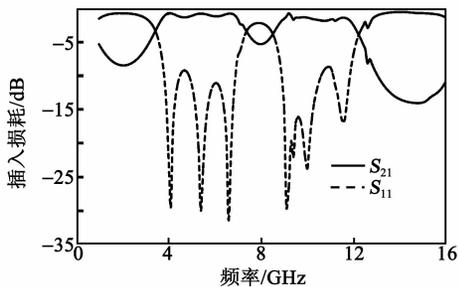


图 7 陷波滤波器 S 曲线

2 两款超宽带平面天线的设计

设计了两款简单的超宽带平面天线,结构如图 8、9 所示。被切割的圆形和微带线组成天线 1(见图 8),缝隙和微带线组成的共面波导构成天线 2(见图 9)。

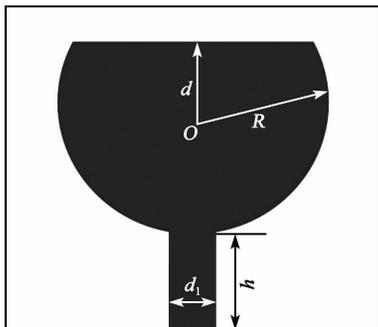


图 8 天线 1 结构图

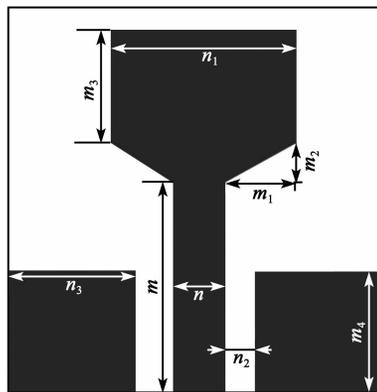


图 9 天线 2 结构图

天线 1 的尺寸为 16 mm × 12 mm,其他的参数为 $h=4$ mm, $R=6$ mm, $d=4$ mm, $d_1=2$ mm; 天线 2 的尺寸为 20 mm × 20 mm,其他的参数为 $m=10$ mm, $m_1=5$ mm, $m_2=4$ mm, $m_3=6$ mm, $m_4=8$ mm; $n=2$ mm, $n_1=12$ mm, $n_2=1$ mm, $n_3=7.8$ mm。

使用 HFSS 软件分别对两款天线进行仿真,可得两款天线的 S_{11} 曲线,如图 10、11 所示。由图可知,该平面天线 1 的通带范围为 2.87~15.46 GHz,平面天线 2 的通带范围为 2.89~11.69 GHz。两款天线结构简单,易加工,通带范围较宽。

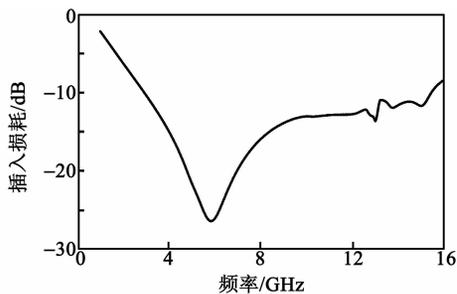


图 10 天线 1

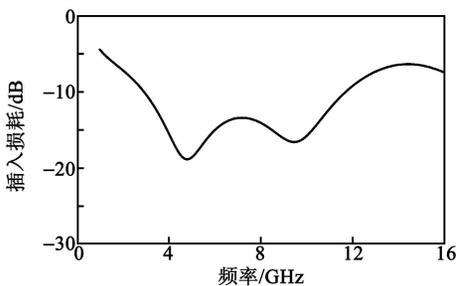


图 11 天线 2

为了提高天线的性能,避免窄带信号对超宽带天线产生电磁干扰,滤除超宽带波段中的窄带信号 X 波段,传统方法通过改变天线形状实现,如在超宽带平面天线矩形接地板开槽,如图 12 所示。图中虚

线所示开槽部分大小为 $4\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 使得超宽带天线在 X 波段具有陷波功能。得到超宽带陷波天线的 S_{11} 曲线, 如图 13 所示。由图 13 可见, 在该超宽带天线 1 出现范围为 $6.32 \sim 9.73\text{ GHz}$ 的陷波, 但陷波范围内回波损耗小于 -8.23 dB , 陷波天线性能不稳定。

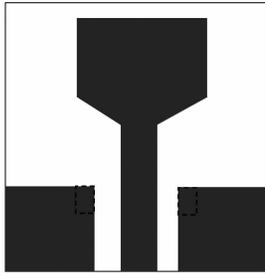


图 12 陷波天线

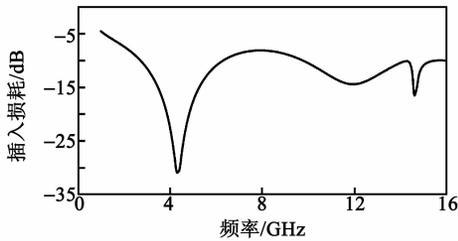


图 13 陷波天线的 S_{11} 曲线

3 基于左手材料的超宽带陷波天线

滤波器和天线作为无线射频前端的重要组成部分, 为了有效滤除窄带信号, 将滤波器和天线集成加载于同一介质板上, 使其具有滤波和辐射的双重特性^[9], 形成基于左手材料的超宽带滤波天线, 结构如图 14~16 所示。滤波天线 1 尺寸为 $12\text{ mm} \times 31.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$, 滤波天线 2 尺寸为 $20\text{ mm} \times 37.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 。

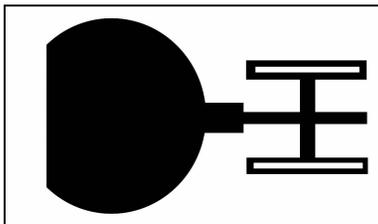


图 14 滤波天线 1 正面结构图

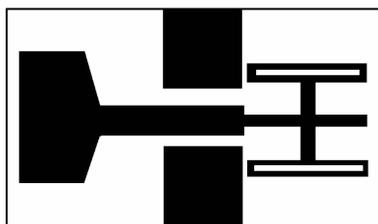


图 15 滤波天线 2 正面结构图

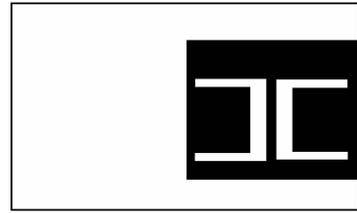


图 16 滤波天线反面结构图

基于左手材料的超宽带滤波天线 1 的 S_{11} 曲线如图 17 所示。由图可看出, 在超宽带天线的工作范围内, 可通过信号的频段为 $2.87 \sim 15.46\text{ GHz}$, 但在经过陷波滤波器后, 可通过的信号频段变为 $3.16 \sim 11.26\text{ GHz}$, 并在 $6.43 \sim 8.60\text{ GHz}$ 内出现陷波, 陷波最高点可达到 -2.71 dB 。基于左手材料的超宽带滤波天线 2 的 S_{11} 曲线如图 18 所示。由图 18 可看出, 在超宽带天线的工作范围内, 可通过信号的频段为 $2.89 \sim 11.69\text{ GHz}$; 通过陷波滤波器后, 可通过的信号频段变为 $3.90 \sim 11.60\text{ GHz}$, 并在 $6.50 \sim 8.60\text{ GHz}$ 内出现陷波, 陷波最高点可达 -1.30 dB 。两款滤波天线的设计避免了 X 波段信号对超宽带信号产生电磁干扰。

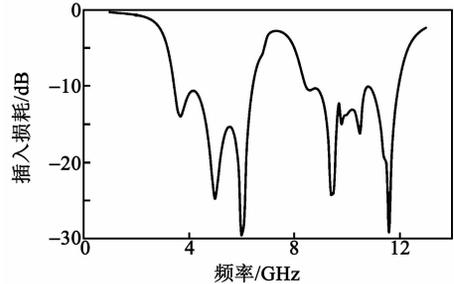


图 17 滤波天线 1 的 S_{11} 曲线

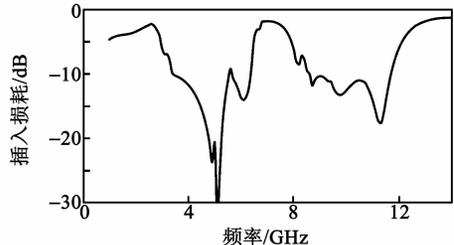


图 18 滤波天线 2 的 S_{11} 曲线

利用 HFSS 软件仿真得到基于左手材料的超宽带滤波天线在 4 GHz 、 10 GHz 、 6 GHz 、 7 GHz 的归一化辐射方向图, 如图 19 所示。由图可看出, 在 4 GHz 、 10 GHz (非陷波处) 滤波天线的 E 面方向图 (xOz) 呈“8”字形结构, H 面 (xOy) 呈圆形结构, 在整个频段内近似于等幅全向辐射, 符合远区辐射特性。在 6 GHz 、 7 GHz (陷波处) 滤波天线辐射方向图严重失真, 在 E 面和 H 面呈现不规则形状, 发生严重畸变。

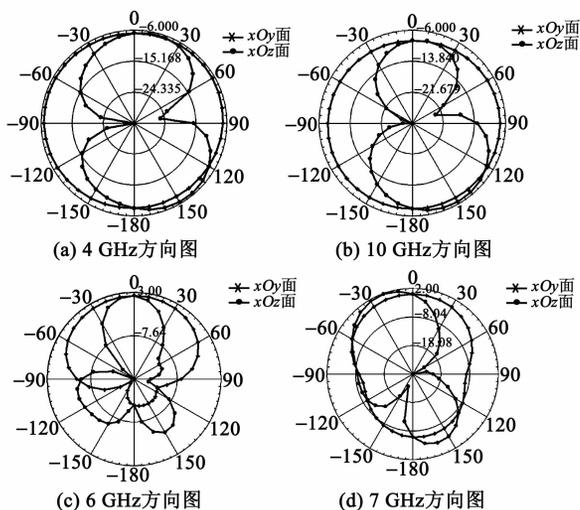


图 19 滤波天线 4 个频率点的方向图

4 结束语

通过在介质板的正、反两面腐刻出十字交叉耦合型结构,设计了一款具有左手材料特征的超宽带陷波滤波器。该滤波器在超宽带范围内通带较宽,通带内回波损耗较理想。利用左手材料的相位补偿特性,突破了滤波器尺寸的限制,得到滤波器的大小为 $7.6 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。设计了两款结构简单、易加工的超宽带天线,将滤波器与天线集成设计于同一介质板上,构成基于左手材料的超宽带滤波天线。该滤波天线结构紧凑,尺寸较小,并在 X 波段高效的滤除窄带信号对超宽带天线产生的电磁干扰。超宽带滤波天线作为一款新型的微波器件,应用在无线通信射频前端,结合左手材料的理论,可实现数据高速传输,具有广阔的发展和前景。

参考文献:

[1] 崔万照,胡天存,张娜,等. 复合左/右手传输线理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

- [2] 曾文波,赵嘉. 左手材料及在微带天线中的应用[J]. 广西工学院学报,2009,20(3):30-35.
ZENG Wenbo, ZHAO Jia. Application of left handed materials and microstrip antennas [J]. Journal of Guangxi University of Technology,2009,20(3):30-35.
- [3] 田子建,彭霞. 基于双三角形谐振环结构左手材料的矩形微带贴片天线[J]. 工矿自动化,2013,39(7):43-46.
TIAN Zijian, PENG Xia. Rectangular microstrip patch antenna based left-handed materials with structure of double triangular resonant ring[J]. Industrial automation, 2013,39(7): 43-46.
- [4] 刘汉,高卫东,孙荣辉. 基于 U 形槽和寄生条带的双陷波超宽带天线[J]. 探测与控制学报,2012,34(3):61-66.
LIU Han, GAO Weidong, SUN Ronghui. Dual band-notch uwb antenna based on U-shaped slot and parasitic strip[J]. Journal of Detection & Control,2012,34(3): 61-66.
- [5] 丁博. 微带滤波天线的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2015.
- [6] 陈新伟. 平衡双频带通滤波器及滤波天线的研究与设计[D]. 太原:山西大学,2008.
- [7] 马润波,张琼,陈新伟,等. 探针馈电贴片天线的建模及其在滤波天线中的应用[J]. 测试技术学报,2015,29(4):137-144.
MA Runbo, ZHANG Qiong, CHEN Xinwei, et al. Modeling of probe fed patch antenna and its application in filter antenna[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015,29(4): 137-144.
- [8] HUANG J Q, CHU Q X. Compact UWB band-pass filter utilizing modified composite right/left-handed structure with cross coupling[J]. PIER, 2010, 107: 179-186.
- [9] 陈龙. 基于复合左右手传输线的滤波天线研究[D]. 成都:电子科技大学,2015.

(上接第 637 页)

- [10] REZAYAT A, PAUW B D, LAMBERTI A, et al. Reconstruction of impacts on a composite plate using fiber Bragg gratings (FBG) and inverse methods[J]. Composite Structures, 2016, 149:1-10.
- [11] RAJAN G, RAMAKRISHNAN M, SEMENOVA Y, et al. Analysis of vibration measurements in a composite material using an embedded PM-PCF polarimetric sensor and an FBG sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5):1365-1371.
- [12] 廖延彪,黎敏. 光纤光学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2013:205-207.

- [13] MULLE M, COLLOMBET F, OLIVIER P, et al. Assessment of cure-residual strains through the thickness of carbon-epoxy laminates using FBGs part II: Technological specimen[J]. Composites Part a Applied Science & Manufacturing, 2009, 40(10):1534-1544.
- [14] 刘荣梅. 基于界面分析的光纤智能复合材料结构强度性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010:37-39.
- [15] 朱永猛,吴军,吴超勇,等. 基于自适应神经模糊推理系统的刀具磨损监测[J]. 兵器装备工程学报,2016(9):115-118.