

# 提高微带天线增益的宽带低损左手结构设计

朱亚鹏, 张正平, 刘桥

贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

**摘要** 为了解决传统左手材料频带窄、损耗高的问题,基于等效电路模型理论和镜像对称原理,设计了一种新型左手结构。研究结果表明,此结构在 16.5~25.4 GHz 频段内的等效介电常数和等效磁导率均为负,绝对带宽达到 8.9 GHz,并且具有低损耗特性。相比于传统的微带天线,基于此左手结构的微带天线的增益提高了 3.38 dB,半功率波束宽缩小了 41.11°,有效辐射功率得到明显增强。

**关键词** 材料; K 波段; 等效电路理论; 宽频带; 低损耗; 微带天线

中图分类号 O441.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031602

## Design of Broadband and Low Loss Left-Handed Structure for Improving Microstrip Antenna Gain

Zhu Yapeng, Zhang Zhengping, Liu Qiao

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

**Abstract** In order to solve the problems of narrow band and high loss related to traditional left-handed materials (LHM), a novel structure of LHM is designed based on the equivalent circuit theory and mirror-symmetry principle. The results show that, as for this structure, its effective permittivity and effective permeability are both negative, its absolute bandwidth reaches 8.9 GHz, and it possesses a low loss characteristic in the frequency range from 16.5 GHz to 25.4 GHz. Compared with those of the traditional microstrip antenna, the gain of the microstrip antenna based on this left-handed structure increases by 3.38 dB, the half power beam width reduces by 41.11°, and the effective radiated power is obviously enhanced.

**Key words** materials; K-band; equivalent circuit theory; broadband; low loss; microstrip antenna

**OCIS codes** 160.4670; 350.3618; 350.4010

## 1 引言

左手材料最早由 Veselago 在 1968 年提出<sup>[1]</sup>,其具有左手特性、后向波特特性、负折射率<sup>[2]</sup>、逆多普勒效应<sup>[3]</sup>及逆契仑可夫辐射效应<sup>[4]</sup>等,被广泛应用于天线、雷达、滤波器等领域中。1996 年, Pendry 等<sup>[5]</sup>用细金属棒阵列和金属谐振环(SRR)组成人造媒质,其等效介电常数和等效磁导率在微波波段均为负值,这为左手材料的研究打下了坚实的基础。

2011 年,杨晨等<sup>[6]</sup>设计了一种十字环型单面结

构,与双面结构的左手材料相比,这种结构的左手材料设计工艺相对简单,但双负带宽有待提高。2014 年,董怀景等<sup>[7]</sup>基于双十字架型的左手结构,实现了宽带低耗,但其损耗还有待进一步减小。2016 年,何政蕊等<sup>[8]</sup>设计了一种周期左手结构,其具有更宽的左手通带,但损耗还需进一步减小。2012 年, Zheng 等<sup>[9]</sup>用 7 个相同的左手材料作为天线罩,将天线的增益提高了 2.5 dB。此后,将左手材料作为天线罩的应用实例被广泛提出。2013 年,张甲楷等<sup>[10]</sup>利用 SRR 作为微带天线的覆层,天线半功率

收稿日期: 2017-08-09; 收到修改稿日期: 2017-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(11204046)、国家科技部国际科技合作项目(2014DFA00670)

作者简介: 朱亚鹏(1993—),男,硕士研究生,主要从事电磁场与微波技术方面的研究。

E-mail: zhuyapeng0450@163.com

导师简介: 刘桥(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电路与系统、微电子技术方面的研究。

E-mail: liuqiao1955@163.com (通信联系人)

波束宽度(HPBW)缩小了 $29^\circ$ ,增益提高了0.23 dB。2014年,韩丽萍等<sup>[11]</sup>在天线罩上添加了一层哑铃型开口环结构材料,HPBW缩小了 $35^\circ$ ,增益提高了2.6 dB。2016年,周后签<sup>[12]</sup>用双Z型结构材料作为覆盖层,HPBW缩小了 $35^\circ$ ,增益提高了2.0 dB。

为了提高左手材料的带宽、减小其单元损耗,本文采用镜像倒L型结构,在介质基板单侧集成了电磁谐振器,基于等效电路理论设计出一种新型的左手结构,其左手特性在16.5~25.4 GHz频段范围内。将此结构材料作为天线覆盖层,增益提高了3.38 dB,HPBW缩小了 $41.11^\circ$ ,实现了微带天线性能的进一步改善。

## 2 结构设计与理论分析

谐振频率 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ ,其中 $L$ 和 $C$ 分别为电感

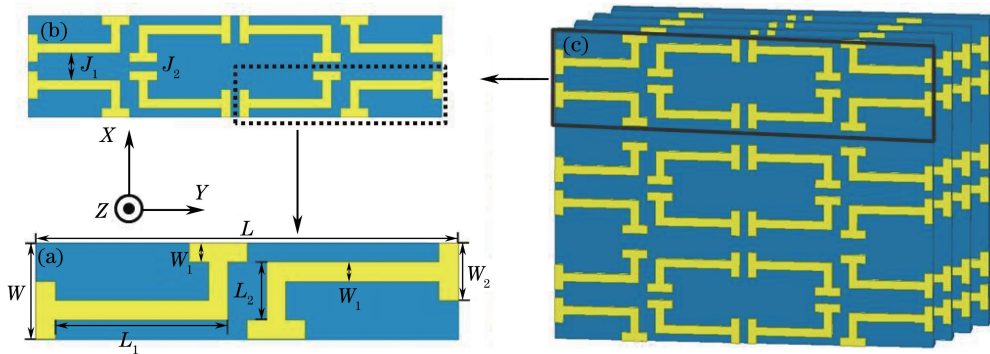


图1 (a)几何结构;(b)单元结构;(c)周期结构

Fig. 1 (a) Geometric structure; (b) unit structure; (c) periodic structure

如图1所示,由镜像对称的倒L型结构组成的电谐振器,以及单元结构中间部分组成的磁谐振器,分别满足双回路和单回路镜像对称原理,故该新型左手结构能很好地克服结构的双各向异性<sup>[13]</sup>。

单元结构的等效电路图如图2所示,其中 $L_0$ 为金属条上的电感, $C_0$ 为相邻两个金属线之间的电容。当穿过这个平面的磁通量发生变化时,电路会产生相应的感应电流 $I_m$ ,在电场的作用下,会产生电流 $I_e$ 。

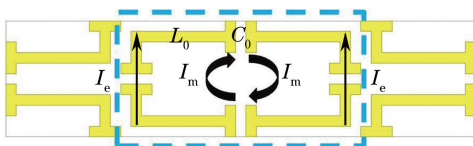


图2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

由图(2)可知,在电谐振等效电路中,总电感 $L_e = L_0$ ,总电容 $C_e = C_0$ 。在磁谐振等效电路中,总

和电容,理想情况下,电磁谐振等效电路中的电容等于电感。对于左手单元结构,当电场和磁场同时存在感性部分和容性部分时,在电磁波入射方向并联电感、串联电容,就可以实现电磁谐振,并且这种结构越简易,获得的左手频带就越宽,产生的损耗越小。

基于这一理论,设计了一种新型左手结构,把金属铜线集成在厚度为0.254 mm、介电常数为3.48的介质基板单侧,金属线宽为0.1 mm,厚度为0.035 mm,如图1(a)所示,该几何结构是由两个镜像对称的倒L型结构组成,其结构尺寸为: $L = 2.2$  mm, $W = 0.5$  mm, $L_1 = 0.9$  mm, $L_2 = 0.3$  mm, $W_1 = 0.1$  mm, $W_2 = 0.3$  mm。将4个几何结构进行排列组合,形成图1(b)所示的新型左手单元结构,几何体之间的间隙为 $J_1 = 0.3$  mm, $J_2 = 0.1$  mm。

电感为 $L_m = 4L_0$ ,总电容为 $C_m = C_0/4$ 。由电路理论可知,电谐振和磁谐振的频率可以分别表示为

$$\omega_e = 1/\sqrt{L_0 C_0}, \quad (1)$$

$$\omega_m = 1/\sqrt{L_0 C_0}. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可知,利用设计的单元结构可实现相等的电谐振频率和磁谐振频率,因此左手频带能达到最宽。

## 3 模型仿真与结果分析

单元结构仿真模型以及相应的边界条件如图3所示,其中 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别表示磁场矢量、电场矢量和电磁波矢量,Port 1和Port 2为波端口,PEC为理想导体材料,PMC为理想磁导体材料。

通过HFSS软件得到的S参数如图4所示。

从图(4)可以得知, $S_{11}$ (输入回波损耗)和 $S_{21}$ (正向传输系数,也就是增益)的谐振点位于17.4 GHz处,回波损耗为-42.6 dB,且 $S_{21}$ 的幅度值

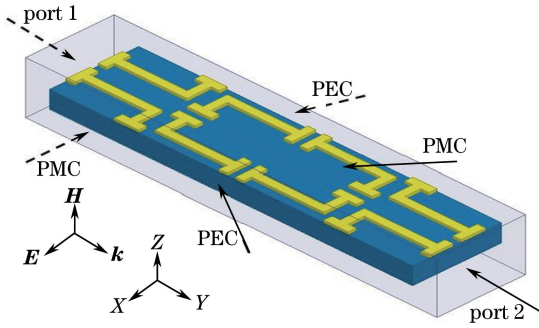


图3 单元结构仿真模型

Fig. 3 Simulation model of unit structure

从 16.3 GHz 处开始逐步减小,这可能标志着左手特性的开始<sup>[14-15]</sup>。通过 NRW 反演算法<sup>[16]</sup>对 S 参

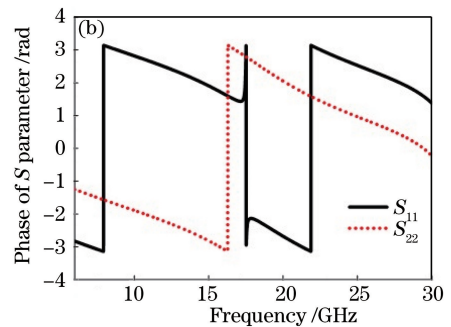
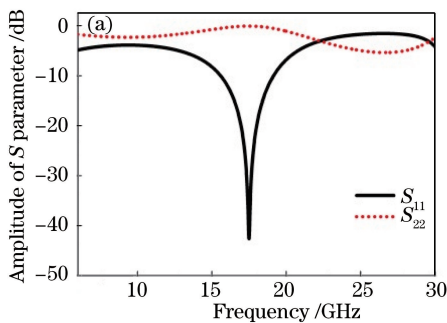


图4 (a) S 参数幅度曲线;(b) S 参数相位曲线

Fig. 4 (a) Amplitude curve of S parameters; (b) phase curve of S parameters

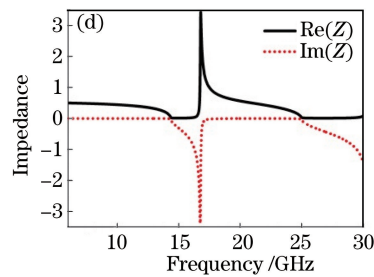
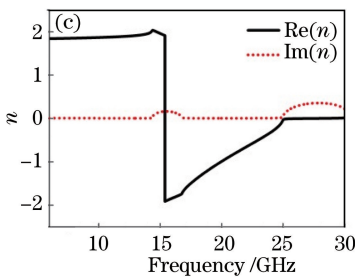
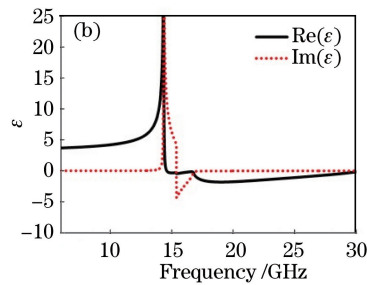
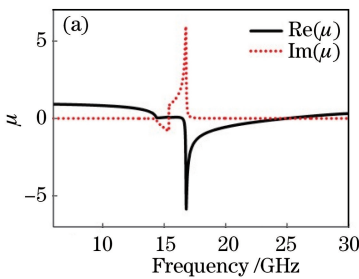


图5 单元结构参数。(a)等效磁导率;(b)等效介电常数;(c)折射率;(d)波阻抗

Fig. 5 Parameters of unit structure. (a) Equivalent permeability; (b) equivalent permittivity; (c) index of refraction; (d) wave impedance

图5所示为单元结构相关的等效电磁参数提取结果,其中  $\text{Re}(\cdot)$  为取实部运算,  $\text{Im}(\cdot)$  为取虚部运

数(散射参数)的仿真结果进行参数运算,算法中所用公式如下:

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (3)$$

$$n = \frac{1}{k'd} \arccos\left(\frac{1 - S_{11} + S_{21}^2}{2S_{21}}\right), \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{n}{Z}, \quad (5)$$

$$\mu = nZ, \quad (6)$$

式中  $n$  为折射率,  $Z$  为波阻抗,  $\epsilon$  为等效介电常数,  $\mu$  为等效磁导率,  $k'$  为入射波矢量的波数,  $d$  为电磁波入射方向的材料厚度。由(3)式~(6)式可知,当  $n < 0$  且  $Z > 0$  时,可实现双负特性。

抗在整个通带内均为正。这说明设计的结构具有良好的左手特性,且带宽较宽。

用品质因数(FOM)  $F_{\text{FOM}}$  表征结构的损耗特性,即

$$F_{\text{FOM}} = \left| \frac{\text{Re}(n)}{\text{Im}(n)} \right|, \quad (7)$$

$F_{\text{FOM}}$  越大,说明损耗越小<sup>[17]</sup>。

新型结构的损耗如图 6 所示,FOM 在左手频带内的最大值达到了 317,同时,频带外的 FOM 接近于 0,表明提出的左手结构的损耗较小。

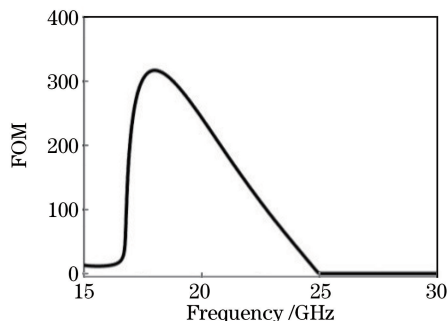


图 6 左手材料的损耗

Fig. 6 Loss in left-handed materials

#### 4 左手结构应用与比较分析

微带天线参数的计算公式<sup>[18]</sup>如下。

微带辐射贴片的宽度  $w$  为

$$w = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (8)$$

式中  $c$  为光速, $f$  为微带线的工作频率, $\epsilon_r$  为基板的介电常数。

贴片的有效长度  $L_{\text{eff}}$  为

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_e}}, \quad (9)$$

式中  $\epsilon_e$  为有效介电常数,计算公式为

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2}. \quad (10)$$

实际的贴片长度  $L$  为

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L, \quad (11)$$

式中  $\Delta L$  为等效辐射长度,计算公式为

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3)(w/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(w/h + 0.8)}, \quad (12)$$

式中  $h$  为介质基底的厚度。

传统微带天线的结构如图 7(a) 所示,将  $3.6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的辐射贴片放置在尺寸为  $7.2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、介电常数为 3.48、厚度为  $0.254 \text{ mm}$  的介质基板上,用 HFSS 软件进行求解。

仿真结果如图 7(b)~(d) 所示,其中  $\theta$  为天线的辐射角度。由图可知,在  $21.18 \text{ GHz}$  处,传统微带天线的增益为  $5.8 \text{ dB}$ ,HPBW 为  $89.66^\circ$ 。

将所设计的新型左手结构材料构造成  $1 \times 15$  的阵列形式,并将其放置于介质内部,天线罩由介质板和呈阵列排布的左手结构构成,如图 8(a) 所示,其仿真结果如图 8(b)~(d) 所示。

为了让正反面的反射波能相互抵消,天线罩的厚度选择为波长的一半。从图 8 的结果中可以分析

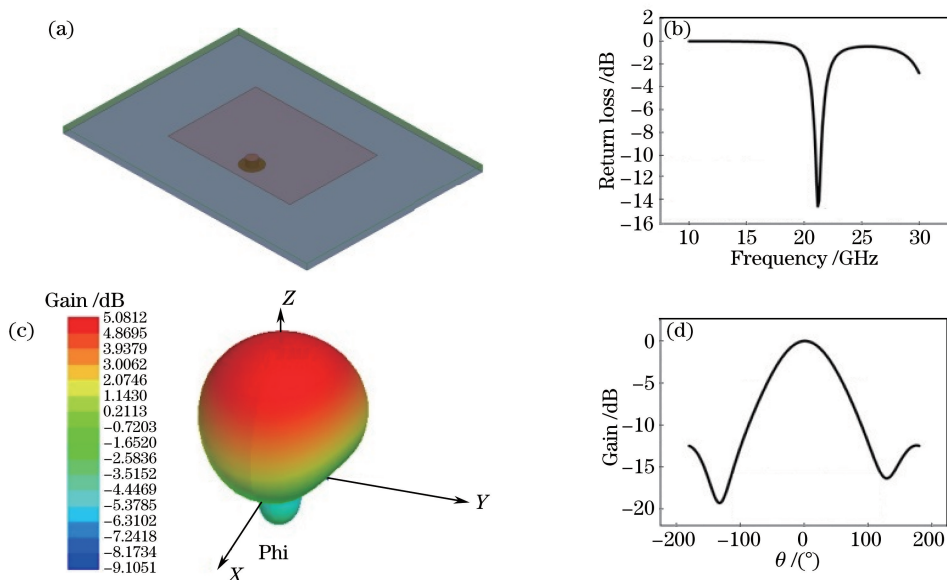


图 7 传统微带天线。(a)示意图;(b)回波损耗;(c)增益;(d)半功率波束宽

Fig. 7 Traditional microstrip antenna. (a) Schematic; (b) return loss; (c) gain; (d) HPBW

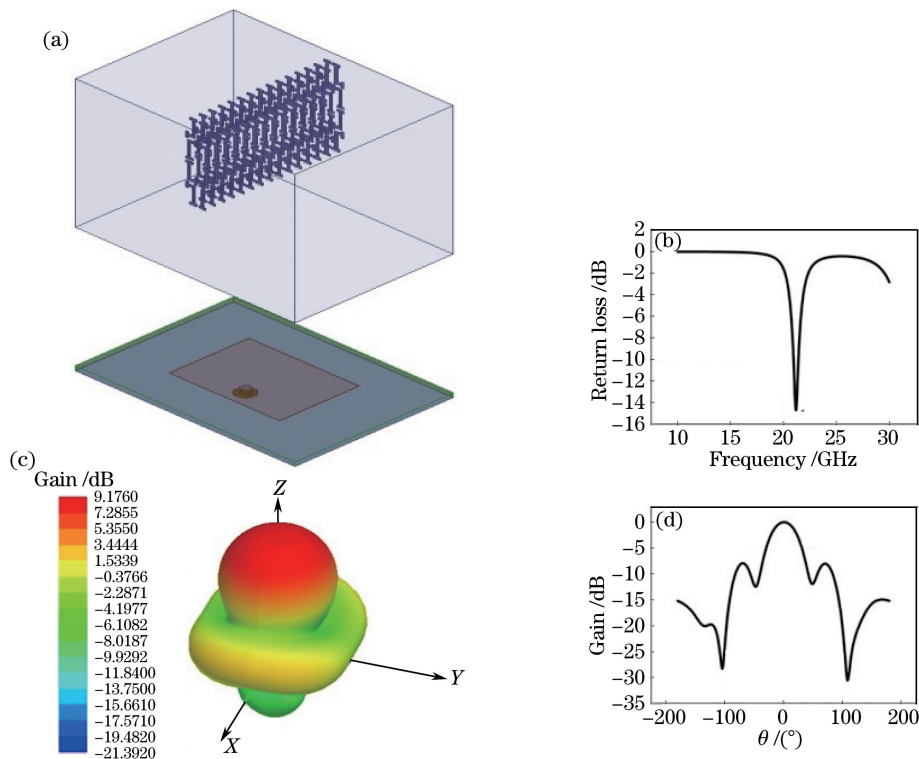


图8 所设计的微带天线。(a)示意图;(b)回波损耗;(c)增益;(d)半功率波束宽

Fig. 8 Designed microstrip antenna. (a) Schematic; (b) return loss; (c) gain; (d) HPBW

出,用新型左手材料作为天线罩的微带天线,其略微增加了微带线的带宽,增益为 9.18 dB,HPBW 为 48.55°。相比于传统的微带天线,其增益增大了 3.38 dB,HPBW 缩小了 41.11°。

将所设计的左手结构微带天线与有关参考文献中的微带天线进行比较分析,结果见表 1,可以看出,所设计的天线系统在增益与天线辐射强度上均有明显的提高。

表 1 不同左手结构微带天线的性能比较

Table 1 Performance comparison of microstrip antenna based on different left-handed structures

Microstrip antenna	Ref. [9]	Ref. [10]	Ref. [11]	Ref. [12]	Proposed
Gain /dB	2.5	0.23	2.6	2.0	3.88
HPBW /(^{\circ})	-	29	35	35	41.11

## 5 结论

基于等效电路理论以及镜像对称原理,设计了一种新型的左手结构,其左手特性发生在 16.5~25.4 GHz 范围内,绝对带宽为 8.9 GHz,相对带宽达到 42.5%,具有良好的左手性能。对传统微带天线和覆盖左手材料天线罩的微带天线进行了仿真与分析,结果表明,后者天线的增益提高了 3.38 dB,

HPBW 缩小了 41.11°,同时其增益与天线辐射强度均有明显的提高。因此,所设计的左手结构为 K 波段左手材料的设计与应用提供了重要参考。

## 参 考 文 献

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative value of  $\epsilon$  and  $\mu$ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [3] Seddon N, Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect[J]. Science, 2003, 302(5650): 1537-1540.
- [4] Lu J, Grzegorzczak T, Zhang Y, *et al.* Cerenkov radiation in materials with negative permittivity and permeability[J]. Optics Express, 2003, 11(7): 723-734.
- [5] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [6] Yang C, Zhang H X, Wang H X, *et al.* Design and simulation of a cross split ring left-handed materials unit structure[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(16):

164101.  
杨晨, 张洪欣, 王海侠, 等. 十字环型左手材料单元结构设计与仿真[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 164101.
- [7] Dong H J, Geng Y L. Double cross-shape broadband low-loss and small units left-handed metamaterials based design and experimental verification[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 024102.  
董怀景, 耿友林. 基于双十字架型宽带低耗小单元左手材料的设计与实验验证[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024102.
- [8] He Z R, Geng Y L. Design and analysis of a new type of wideband low-loss and small size left-handed materials[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(9): 094101.  
何政蕊, 耿友林. 一种新型宽频带低损耗小单元左手材料的设计与实现[J]. 物理学报, 2016, 65(9): 094101.
- [9] Zheng K S, Li N J, Ren A K, *et al.* Designing and measurement of a single layered planar gain-enhanced antenna radome with metamaterials[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2012, 26(4): 436-445.  
张甲楷, 丁君. 基于左手材料提高微带天线方向性的研究[J]. 现代电子技术, 2013, 36(23): 81-84.
- [11] Han L P, Zhao Y J, Qu M J. Compact differential microstrip antenna based on LHMs[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2014, 28(2): 1671.  
韩丽萍, 赵亚娟, 曲美君. 基于左手材料的小型化差分微带天线[J]. 测试技术学报, 2014, 28(2): 1671.
- [12] Zhou H Q. Research and design of left-handed metamaterial structure and application for microstrip antenna[D]. Hunan: Hunan University, 2016: 54-72.  
周后签. 新型左手材料结构及其在微带天线中的应用[D]. 湖南: 湖南大学, 2016: 54-72.
- [13] Wang J F, Qu S B, Xu Z, *et al.* A method of analyzing transmission losses in left-handed metamaterials[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5015-5019.  
王甲富, 屈绍波, 徐卓, 等. 磁谐振和电谐振结构构成的左手材料设计[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5015-5019.
- [14] Yang H, Wang C H, Guo X R. A novel dual-band left-handed metamaterials composed of multi-defects hexagonal structure[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014103.  
杨怀, 王春华, 郭小蓉. 基于正六边形多开口的新型双频带左手材料[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014103.
- [15] Ma M Z, Qin W P. Parametric studies of an artificial electromagnetic material based on the fishnet structure[J]. Journal of Nanjing University of Posts & Telecommunications (Natural Science Edition), 2011, 31(6): 113-116.  
马明章, 秦卫平. 基于渔网结构的人工电磁材料结构参数研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2011, 31(6): 113-116.
- [16] Ziolkowski R W. Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2003, 51(7): 1516-1529.
- [17] Jin D L. Research on left-handed metamaterials and the applications of metamaterials in antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 22-24.  
金大琳. 左手材料及其在天线的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 22-24.
- [18] Bagri R K, Meena S. Design and analysis of rectangular microstrip patch antenna using metamaterial for better efficiency[J]. International Journal of Advanced Technology & Engineering Research, 2015, 2(2): 2394-8124.