

# 一种新型宽频低损左手材料设计

王宝, 张正平

贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

**摘要** 通过在衬底材料单侧周期性排列金属线与方形开口谐振环,设计了一种新型左手结构。通过理论分析和软件仿真,提取了该左手材料的有效电参数。结果表明,在 11.7~20.5 GHz 频段内,该左手结构表现出良好的负折射效应与双负特性,绝对带宽达 8.8 GHz,对 Ku 波段(8~12 GHz)实现了全覆盖,单元损耗小于 0.4 dB。加工制作了实物并对其进行了测试,验证了其左手特性。与传统左手材料相比,所设计的左手材料实现了低损耗和宽频带。

**关键词** 材料; 负磁导率; 负介电常数; 宽频带; 绝对带宽

中图分类号 O441

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041603

## Design of a Novel Broadband Low Loss Left-Handed Material

Wang Bao, Zhang Zhengping

*Institute of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang,*

*Guizhou 550025, China*

**Abstract** A novel left-handed structure is designed by periodically arranging metal wires and square diagonal-opening resonators on a single side of a substrate material. Based on the theoretical analysis and software simulation, the effective electromagnetic parameters of this designed left-handed material are extracted. The results show that, in the frequency band of 11.7-20.5 GHz, this structure possesses a good negative refraction effect and double negative characteristics and its absolute bandwidth is 8.8 GHz, which coverages the whole Ku band (8-12 GHz), and the loss of unit cell is less than 0.4 dB. Its real object is fabricated and tested, and its left-hand characteristic is confirmed. Compared with the conventional left-handed materials, the designed left-handed material realizes a low loss and a wide bandwidth.

**Key words** materials; negative magnetic permeability; negative dielectric constant; broadband; absolute bandwidth

**OCIS codes** 160.3918; 300.9495; 260.2110

## 1 引言

Veselago<sup>[1]</sup>在 20 世纪 60 年代首次提出左手材料概念,指出这种材料的介电常数  $\epsilon$  及磁导率  $\mu$  都为负值。由于这种独特的物理性质,左手材料在光学、电磁学、太赫兹等领域都具有重要的科研价值以及广泛的应用前景。然而,自然界中不存在天然的左手材料。2001 年,Smith 等<sup>[2-3]</sup>取得突破性研究,依据 Pendry 等<sup>[4-5]</sup>的理论模型,制造出世界上第一块左手材料。到目前为止,科研人员已经设计制造

出多种左手材料<sup>[6-11]</sup>,但是这些结构都存在一系列缺陷,如有的单元结构过大,有的损耗大、带宽小,有的性能不稳定,有的不利于加工等。

本文通过在介质基底单侧周期性排列金属线与方形开口谐振环,形成左手结构。在理论分析的基础上,通过改变方环的开口宽度以及十字形金属线长度的排列方式,运用 HFSS 软件仿真提取有效电参数,结果表明,在 11.7~20.5 GHz 频段内,材料的磁导率、介电常数以及折射率同时为负,绝对带宽达 8.8 GHz,基本覆盖 Ku 波段(8~

收稿日期: 2017-09-27; 收到修改稿日期: 2017-11-06

基金项目: 国家科技部国际合作项目(2014DFA00670)

作者简介: 王宝(1990—),男,硕士研究生,主要从事电磁材料方面的研究。E-mail: wujige163@163.com

导师简介: 张正平(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事信号处理、通信新技术、微波器件等方面的研究。

E-mail: zpzhang@gzu.edu.cn(通信联系人)

12 GHz), 单元损耗小于 0.4 dB。与传统左手材料相比, 实现了低损耗、宽频带。

## 2 左手材料结构设计与分析

### 2.1 结构设计

从刻蚀类型方面, 左手材料目前可分为单侧刻蚀与双侧刻蚀两种。吴良威等<sup>[12]</sup>基于多开口田字形宽频带低损耗左手材料, 采用单侧刻蚀方式, 单元损耗低于 0.3 dB, 绝对带宽达到 8.4 GHz, 成功实现了宽频带低损耗。从结构设计方面, 左手材料可分为谐振型结构和复合左右手传输线结构(CRLHTLs)。谐振型结构产生负介电常数和负磁

导率的机理为: 当一定频率的电磁波入射到单元结构上时, 在结构单元内部产生电磁等离子体, 激发出电谐振和磁谐振, 从而产生等效介电常数与等效磁导率均为负值的左手特性。CRLHTLs 结构是经过调整传输线结构, 改变其分布参数, 从而实现一定频段内的左手通带。

基于谐振型结构设计理论, 在介质基板的一侧周期性集成谐振器, 使左手材料在一定的频率下产生左手特性。具体结构如图 1 所示, 其中  $d_1 = d_2 = 2.97 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 1.90 \text{ mm}$ ,  $d_4 = 0.20 \text{ mm}$ ,  $d_5 = 1.70 \text{ mm}$ ,  $d_6 = 1.95 \text{ mm}$ , 线宽均为 0.2 mm, 介质基板的厚度为 0.245 mm, 介质基板的相对介电常数为 3.48。

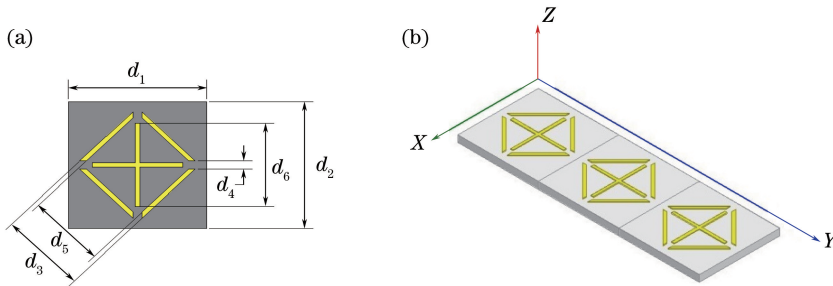


图 1 (a) 结构几何参数; (b) 单元结构

Fig. 1 (a) Structural geometric parameters; (b) unit structure

### 2.2 等效负磁导率与介电常数的分析

该结构的等效负磁导率主要是由结构外围的方形开口谐振环在磁场的作用下产生。磁谐振等效示意图如图 2(a) 所示。当磁场作用在谐振环上时, 穿过谐振环的磁通量发生变化, 谐振环上产生感应电

流  $I_m$ , 外环可以看成图 2(b) 所示的等效电路, 外环的每条金属边的等效电感用  $L_{m0}$  表示, 外环单个开口处的等效电容用  $C_{m0}$  表示, 则总电感  $L_m = 4L_{m0}$ , 环路总电容  $C_m = C_{m0}/4$ , 环路的磁谐振频率  $f_m = \sqrt{L_m C_m} / (2\pi) = \sqrt{L_{m0} C_{m0}} / (2\pi)$ 。

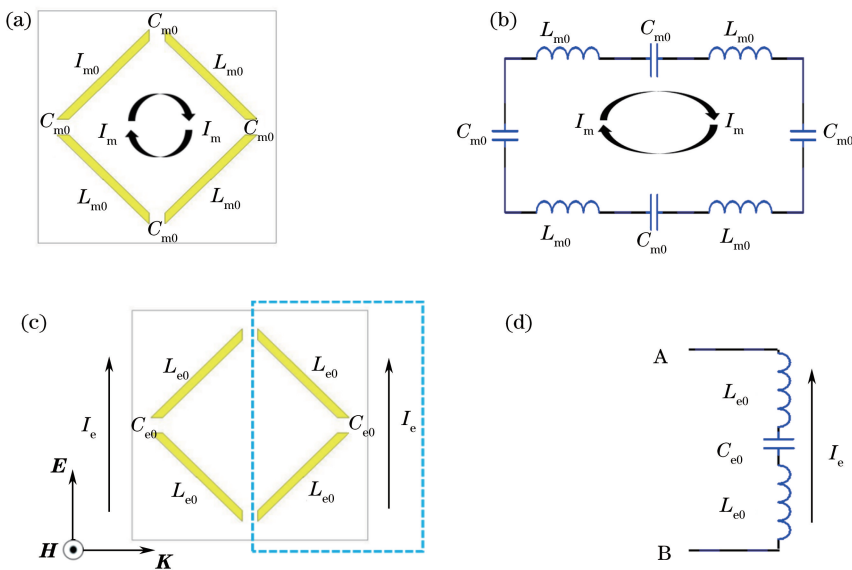


图 2 (a) 磁谐振等效示意图; (b) 磁谐振等效电路; (c) 电谐振等效示意图; (d) 电谐振等效电路

Fig. 2 (a) Equivalent diagram of magnetic resonance; (b) equivalent circuit of magnetic resonance; (c) equivalent diagram of electric resonance; (d) equivalent circuit of electric resonance

电谐振等效示意图如图 2(c) 所示, 其中  $\mathbf{E}$  表示电磁波的电场强度,  $\mathbf{H}$  表示电磁波的磁场强度,  $\mathbf{K}$  为电磁波波矢。当电场作用在环上时, 同样可以将谐振环等效为图 2(d) 所示的电路, 由于电场的作用, A、B 两端就会产生感应电动势, 进而会产生感应电流  $I_e$ 。可以明显看出, 谐振电路总电感为  $2L_{e0}$ , 总电容为  $C_{e0}$ , 则由电场产生的电谐振频率  $f_e = \sqrt{2L_{e0}C_{e0}}/(2\pi)$ 。在结构中引入十字金属线结构, 以增强单元结构的电谐振<sup>[13]</sup>。基于谐振理论, 设计出了图 1 所示的左手结构。

在磁谐振等效电路中, 设  $L_{m0} = L_0, C_{m0} = C_0$ 。在电谐振等效电路中,  $C_{e0} = C_0$ , 由于开口环的金属边与电场方向间的夹角为  $45^\circ$ ,  $L_{e0} = L_0/2, f_m = f_e = \sqrt{L_0C_0}/(2\pi)$ 。结构的磁谐振频率等于电谐振频率, 此时结构的左手带宽达到最大值<sup>[14]</sup>。

### 3 电磁仿真分析

使用 HFSS 软件分析所设计的结构仿真。在仿真时, 矩形波导的几何参数为  $2.97 \text{ mm} \times 9.11 \text{ mm} \times 0.76 \text{ mm}$ 。具体边界条件的设置如图 3(a) 所示, 将与 XOZ 平面平行的两个平行波导壁分别设为电磁波的人射和出射端口。将平行于 XOY 平面的两个波导壁设为理想磁壁 (PMC), 将平行于 YOZ 平面设为理想电壁 (PEC)。仿真过程中设起始频率为 6 GHz, 最高频率设置为 26 GHz, 频率点步长设为 0.01 GHz。仿真分析得到 S 参数 (散射参数) 的幅度曲线和相位曲线, 如图 3(b)、(c) 所示。

由图 3(b) 可知, 反射系数  $S_{11}$  (端口 2 匹配时, 端口 1 的反射系数) 和传输系数  $S_{21}$  (端口 2 匹配时, 端口 1 到端口 2 的正向传输系数) 的谐振点位于 10.2 GHz 和 20 GHz 处, S 参数回波损耗为  $-53.73 \text{ dB}$ , 两个谐振点之间的损耗小于 1.29 dB。由图 3(c) 可知,  $S_{21}$  的相位曲线从 10.02 dB 处开始下降, 这预示着双负区域的开始。为更直观地观测材料具体的双负区间, 用 NRW 反演算法提取结构的等效电磁参数<sup>[15]</sup>, 即

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

$$n = \frac{1}{kd} \alpha \cos\left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2 \times S_{21}}\right), \quad (2)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = n/Z, \quad (3)$$

$$\mu_{\text{eff}} = n \times Z, \quad (4)$$

式中  $\epsilon_{\text{eff}}$  为等效介电常数,  $\mu_{\text{eff}}$  为等效磁导率,  $n$  为折射率,  $Z$  为特性阻抗,  $k$  为相位常数,  $d$  为介质基板的厚度。

通过参数提取法得到的电参数如图 4 所示, 可以看出, 等效介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$  在 10.05 ~ 19.85 GHz 频率范围内小于零, 等效磁导率  $\mu_{\text{eff}}$  在 10.05 ~ 19.45 GHz 频率范围内小于零。结合图 4 及 S 参数曲线可知, 在 10.05 ~ 19.45 GHz 的频段范围内, 该左手结构表现出左手特性。

品质因数  $X_{\text{FOM}}$  是衡量结构损耗的一个参数, 即

$$X_{\text{FOM}} = |\text{Re}(n)/\text{Im}(n)|, \quad (5)$$

$X_{\text{FOM}}$  越大, 说明损耗越小<sup>[16]</sup>。图 5 所示为品质因数随频率变化的曲线。

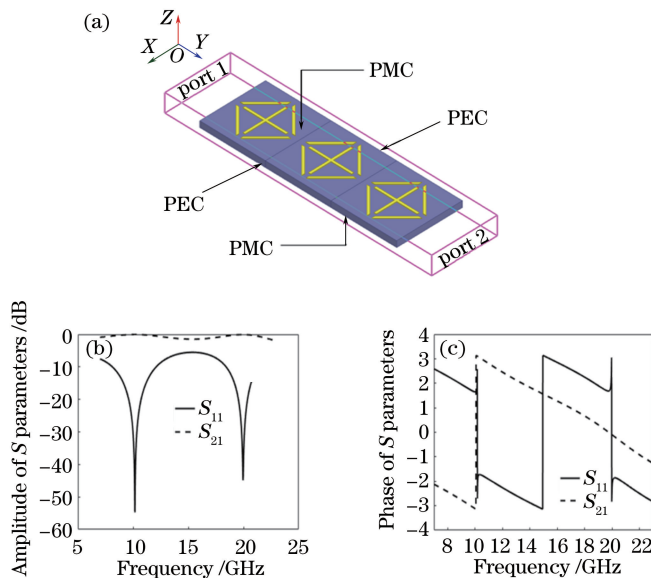


图 3 (a) 结构仿真图; (b) S 参数幅度图; (c) S 参数相位图

Fig. 3 (a) Structure simulation map; (b) magnitude map of S parameters; (c) phase map of S parameters

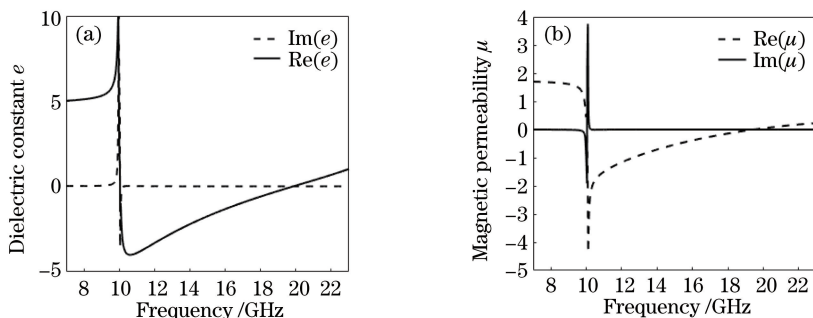


图 4 (a)等效介电常数;(b)等效磁导率

Fig. 4 (a) Equivalent dielectric constant; (b) equivalent permeability

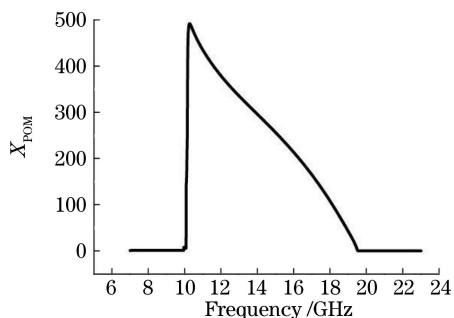


图 5 左手区域的损耗

Fig. 5 Loss of left-handed area

由图 5 可知,在双负频带内, $X_{\text{FOM}}$  达到了 490,在双负频带外  $X_{\text{FOM}}$  接近于 0,因此该结构是低损结构。

## 4 实验验证

采用目前比较成熟的波导法,用矢量网络分析仪结合波导联合测试。矢量网络分析仪选用美国安

捷伦科技有限公司生产的 N5230A 型,波导选用国标 BJ120 型,待测样品长度如图 6(a)左所示,实际样品尺寸为  $8.81 \text{ mm} \times 7.00 \text{ mm}$ 。样品的介质基板介电常数为 3.48,实测时用 EVA 海绵将样品隔开,叠在一起,然后按图 6(a)右所示的排布方式塞入波导管内。

S 参数实测结果如图 6(c)所示,可以看出,实测数据与仿真数据存在一定偏差,偏差主要集中在以下两点:1) 谐振起始点从 10.05 GHz 右移到了 11.3 GHz 处;2) 损耗相对仿真数据有所变大。众所周知,软件仿真时的物理条件都是理想的,而实测存在很多不确定因素。在高频段,微波器件对环境十分敏感,很小的加工误差就会引起结果的很大变化。测试样品与波导壁之间的不均匀间隙对测试结果影响很大,测试时,填充物 EVA 海绵也是引起误差的原因之一。以上这些原因最终造成 S 参数的相位发生变化。利用实测的 S 参数进行反演,得到

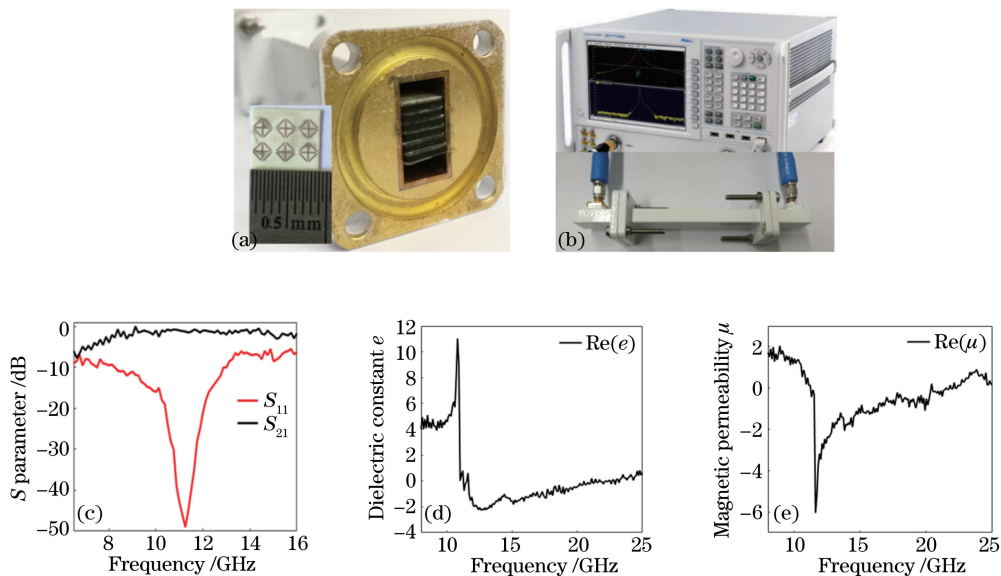


图 6 (a)待测样品及其在波导管内的排布方式;(b)联合测试设备;(c)实测 S 参数;(d)实测介电常数;(e)实测磁导率

Fig. 6 (a) Sample to be tested and its marshalling pattern in waveguide; (b) joint testing equipment;

(c) measured S parameters; (d) measured permittivity; (e) measured permeability

测试结构的介电常数和磁导率,分别如图 6(d)、(e) 所示。由图 6(d)可知,介电常数  $\epsilon$  在 11.7 ~ 21.3 GHz 的频率范围内为负,磁导率  $\mu$  在 11.5' 20.5 GHz 的频率范围内为负,两者在 11.7 ~ 20.5 GHz 的频带范围内同时为负。虽然实际测试数据与仿真结果存在偏差,但是从谐振起始点处开始,依然存在一个带宽为 8.8 GHz 的双负区域,这就说明测试数据依然可以用来佐证该结构的左手特性。

在表 1 中列出了几类近几年发表的左手结构的相关参数,并与本文所设计的结构进行了对比。可以看出,所设计的左手结构在频带宽度和损耗上实现了一定的突破。

表 1 左手材料性能对比

Table 1 Performance comparison among left-handed materials

Reference	Absolute bandwidth / GHz	Unit loss / dB
[12]	8.40	<0.30
[17]	3.90	<5.00
[18]	6.60	<0.15
[19]	6.79	<0.27
This paper	8.80	<0.40

## 5 结 论

运用左手材料基本原理,结合仿真分析软件,设计了一种方形对角开口谐振环与十字架相结合的新型左手结构。仿真分析与实测结果表明,在 11.7 ~ 20.5 GHz 的频段内,该结构表现出左手特性。绝对带宽达到了 8.8 GHz,相对带宽为 54%,对 Ku 波段实现了全覆盖,单元结构的平均损耗控制在 -0.4 dB 以内,为左手材料的设计与运用提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simulataneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] Shelby R, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, *et al.* Left-handed metamaterials [M]. Netherlands: Springer, 2001: 351-371.
- [4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, *et al.* Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Physical Review Letters, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [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] Yi Q, Zhou F K, Zhang M, *et al.* Dual-band S-shaped left-handed material for millimeter wave communication application [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0416003.  
易强, 周辅坤, 张蒙, 等. 用于毫米波通信的双频带 S 型左手材料 [J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0416003.
- [7] Chen H, Ran L, Huangfu J, *et al.* Left-handed materials composed of only S-shaped resonators [J]. Physical Review E, 2004, 70(2): 057605.
- [8] 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.
- [9] Liang L J, Yan X, Yao J Q, *et al.* Two-dimensional left-handed material based on parallel metallic double rods in terahertz wave [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0316001.  
梁兰菊, 闫昕, 姚建铨, 等. 基于平行金属双柱的太赫兹波二维左手材料 [J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0316001.
- [10] Yang C, Zhang H X, Wang H X, *et al.* Design and simulation of a cross split ring lefthanded 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.
- [11] Shen C C, Li M Q, Zhou Y G, *et al.* Novel structure design of left-handed material with broadband and low loss [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091602.  
沈纯纯, 李民权, 周永光, 等. 一种新型的宽频带低损耗左手材料结构设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091602.
- [12] Wu L W, Zhang Z P. Broadband and low-loss left-handed materials based on multi-opening cross shape structures [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(16): 164101.



- 吴良威, 张正平. 基于多开口田字形宽频带低损耗左手材料[J]. 物理学报, 2016, 65(16): 164101.
- [13] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, *et al.* Pendry *et al.* Reply[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(21): 4136.
- [14] Gu C, Zhang X. A novel structure of left-handed material with equal magnetic and electric resonant frequency[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 2800504 .
- [15] Smith D R, Vier D C, Koschny T, *et al.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. Physical Review E, 2005, 71(3): 036617.
- [16] 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.
- [17] Li W Q, Cao X Y, Gao J, *et al.* Broadband and low-loss left-handed metamaterial composed of oblique triangular open-loop pairs resonator[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(15): 154102.  
李文强, 曹祥玉, 高军, 等. 基于斜三角开口对环的宽带低耗左手材料[J]. 物理学报, 2012, 61(15): 154102.
- [18] 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.
- [19] 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.