

Frequency Reconfigurable Compact Antenna Using CRLH-TL Structure

YANG Hong*, HE Li, ZHANG Hongsheng

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

Abstract: A new type of non-resonant miniaturized frequency reconfigurable antenna based on the π -type composite right/left-handed transmission lines is proposed. The dual helix structure and fork finger structure of the antenna provide left-hand capacitance and right-hand inductance. Combined with through hole technology, the left-hand inductance is provided. The PIN diode is used to control the change of working frequency by controlling the switch of the diode. When the diode is on, the central frequency points are 2.35 GHz and 4.05 GHz. When the PIN diode is off, the central frequency points are 2.39 GHz, 3.48 GHz, 4.04 GHz and 5.81 GHz. The simulation and physical test results show that the designed antenna operating frequency band covers WiMAX and WLAN band, and realizes the full radiation. The antenna has the advantages of small size, wide band, simple structure and so on, and has a wide application value.

Key words: CRLH-TL; non-resonant; frequency reconfigurable; antenna

EEACC: 5270B; 5260

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.02.008

基于复合左右手传输线的小型化频率可重构天线

杨 虹*, 何 莉, 张红升

(重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 提出了一种基于 π 型复合左右手传输线的非谐振型小型化频率可重构天线。该天线的双螺旋结构和叉指结构提供左手电容和右手电感, 结合通孔技术提供左手电感, 并采用 PIN 二极管, 通过控制二极管的开关控制工作频率的改变。当二极管导通时, 中心频点为 2.35 GHz 和 4.05 GHz, 当 PIN 二极管断开时, 中心频点为 2.39 GHz, 3.48 GHz, 4.04 GHz 和 5.81 GHz。仿真和实物测试结果表明, 所设计的天线工作频段覆盖 WiMAX 和 WLAN 频段, 且实现全向辐射。该天线有尺寸小、频带宽、结构简单等优点, 具有广泛的应用价值。

关键词: 复合左右手传输线; 非谐振; 频率可重构; 天线

中图分类号: TN61

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2022)02-0287-07

近年来, 超材料 (metamaterials, MTMs) 由于具备传统材料所不具备的特殊性质, 在微波器件和电路中引起了广泛的关注^[1-2]。常见的 MTMs 包括复合左右手传输线 (Composite Right/Left Handed Transmission Line, CRLH-TL)、负介电常数传输线 (Epsilon-Negative Transmission Line, ENG-TL) 和负磁导率传输线 (Mu-Negative Transmission Line, MNG-TL)^[3-6]。CRLH-TL 具有零阶谐振 (Zeroth-Order Resonance, ZOR) 特性, 是设计紧凑型天线的合适材料^[7-8]。在 ZOR 模型中, 当谐振频率为非零

时, 相位常数为零。天线频率不受天线谐振器物理尺寸的影响, 为实现天线小型化提供了可能。

为了实现紧凑型天线, 文献[9]中报道了一种交指电容加载的 ZOR 天线, 其带宽为 15.1%, 峰值辐射增益为 1.62 dBi。在文献[10]中, 作者提出了一种非对称共面波导 (Asymmetric Coplanar Waveguide, ACPW) 馈电的 ZOR 天线, 并将带宽扩展到 109.1%。终端短路 CRLH-TL 的 ZOR 和一阶正向谐振 (First-Positive-Order Resonance, FPOR) 分别是半个和一个波长共振。文献[11]提出了一种紧凑型 ENG-TL 天

线,其带宽在 5.25 GHz~13 GHz 的宽频范围内,覆盖了 UWB 通信的上工作频带。

基于 CRLH 的频率可重构天线不仅可以实现小型化,而且可以在小型化的基础上实现变频功能。目前,频率可重构天线中使用了各种开关,如变容二极管^[12]、PIN 二极管^[13]和微电子机械系统 (MEMS)^[14]。

本文提出了一种新颖的频率可重构小型化 CRLH-TL 天线。该天线由双螺旋结构、叉指结构、通孔结构和 PIN 二极管构成,在实现复合左右手传输线的基础上,还可以实现频率的转换。

1 天线设计与分析

本文设计的频率可重构 CRLH-TL 天线的几何结构如图 1 所示。复合左右手传输线可分为谐振型 CRLH-TL 和非谐振型 CRLH-TL,谐振型 CRLH-TL 由开口谐振环和金属棒组成,非谐振型 CRLH-TL 由折线结构、叉指结构和过孔等方式实现,非谐振 CRLH-TL 可更好地实现平面射频器件的集成化^[15]。

本文设计的天线是由双螺旋结构、叉指结构、通

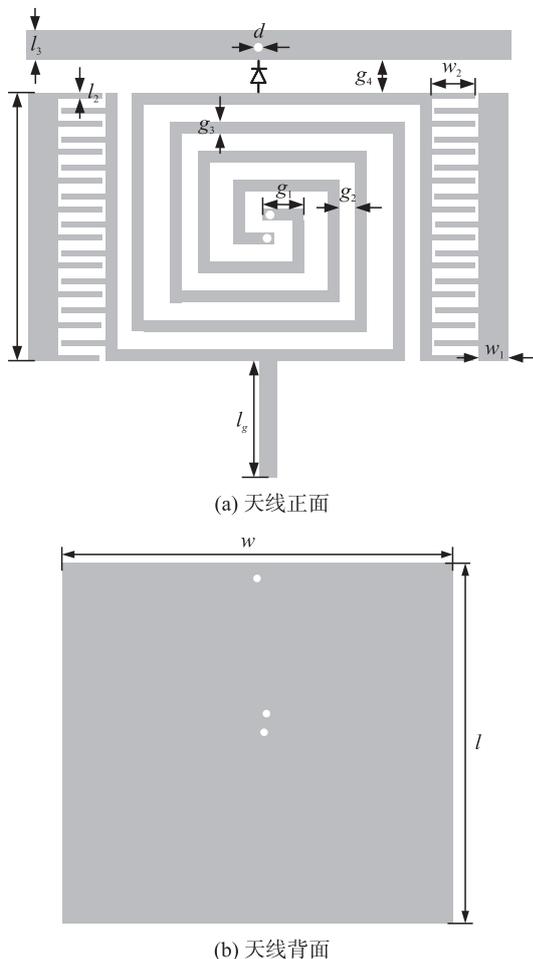


图 1 CRLH-TL 天线结构示意图

孔结构和 PIN 二极管组成。天线的厚度为 1.6 mm、相对介电常数为 4.4、损耗角正切为 0.02,基板材料为 FR4。天线的尺寸只有 16.5 mm×15.2 mm。

1.1 CRLH-TL 理论与天线结构

无损耗 CRLH-TL 单元的等效电路模型由左手单元和右手单元组成。串联电容器 C_L 和并联电感 L_L 代表左手单元,而串联电感 L_R 和并联电容器 C_R 代表右手单元。CRLH-TL 单元的色散关系 $\beta(\omega)$ 可表示如下^[16]：

$$\beta(\omega)p = \arccos \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_L^2 + \omega^2}{\omega^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_R^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_{se}^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_{sh}^2} \right) \right] \quad (1)$$

式中：

$$\omega_L = 1/\sqrt{C_L L_L}, \omega_R = 1/\sqrt{C_R L_R} \quad (2)$$

$$\omega_{sh} = 1/\sqrt{C_R L_L}, \omega_{se} = 1/\sqrt{C_L L_R}$$

$\beta(\omega)$ 是传播常数, p 是单元的物理长度。如果 N 个单元串联级联,则 CRLH-TL 的共振条件表示为^[16]：

$$\beta_n p = \frac{n\pi p}{l} = \frac{n\pi}{N} (N=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1)) \quad (3)$$

式中： β_n 为第 n 阶谐振的传播常数, N 为常数, n 和 l 分别为谐振阶数和谐振器的总长度。当 $n=0$ 时, ZOR 会被激发。

天线的等效电路模型如图 2 所示。在建模过程中,采用 PIN 二极管 (型号: SMP 1322) 来控制频率的变化。图 2(a) 显示了二极管导通状态下的天线等效电路模型,图 2(b) 显示了二极管断开状态下的天线等效电路模型。双螺旋结构和叉指结构构成了右手电感和左手电容,双螺旋结构中心的两个通孔接地构成了左手电感,结合贴片本身与金属地之间的右手电容,从而构成了 π 型复合左右手传输线结构。

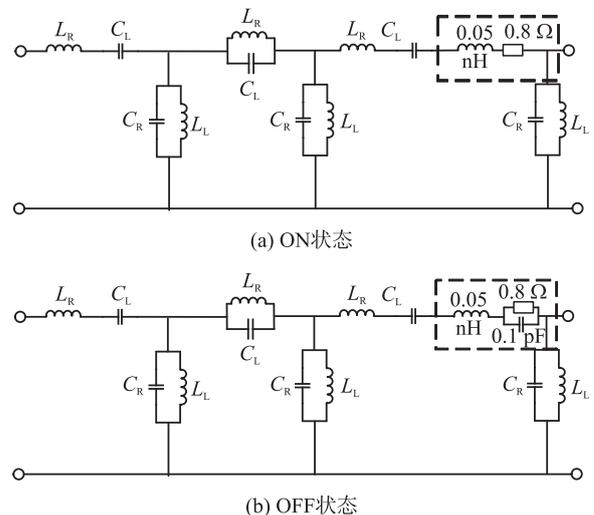


图 2 天线的等效电路模型

将天线单元进行周期性仿真,将得到其 S 参数,根据文献[17]绘制色散图:

$$\beta p = \arccos \left[\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \right] \quad (4)$$

色散图如图 3 所示,横轴为色散值 β ,当色散值趋于零时,则为零阶谐振(ZOR),从图中可以看出,零阶谐振点为 2.4 GHz。其中,零阶谐振点为:

$$\omega_{\text{ZOR}} = \omega_{\text{sh}} = 1/\sqrt{C_R L_L} \quad (5)$$

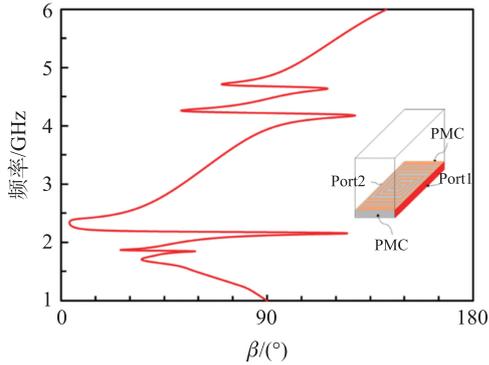


图 3 CRLH-TL 单元色散图

以串联阻抗和并联导纳表示的特性阻抗由下式给出:

$$Z_c = \sqrt{\frac{j(\omega L_R - (1/\omega C_L))/p}{j(\omega C_R - (1/\omega L_L))/p}} \quad (6)$$

1.2 天线参数分析

利用 HFSS 软件仿真了天线在二极管开关状态下的回波损耗。串联谐振频率 f_{se} 与左手电容 C_L 和右手电感 L_R 有关,并联谐振频率 f_{sh} 与右手电容 C_R 和左手电感 L_L 有关。左手电容受到双螺旋间隙宽度的影响,左手电感受到叉指长度的影响。因此,本文选取双螺旋间隙宽度 g_2 、 W_2 和 g_4 作为主要结构参数。为了保证参数分析的合理性,本文采用控制变量法。 g_2 、 W_2 和 g_4 的初始值分别为 0.6 mm、1.4 mm 和 0.9 mm。在其他参数不变的情况下,依次增大参数。

如图 4 所示,当二极管导通和断开时, g_2 分别增大。可以看出,当二极管导通时,随着 g_2 的增大,谐振频率点有明显的左移。当二极管断开时,三个谐振频率点有较大幅度的左移。当 g_2 增大时,此时左手电容增大,串联谐振频率减小。

然后,在其他参数不变的情况下,改变 W_2 ,如图 5 所示。当二极管导通时,随着 W_2 的增大,两个频点几乎没有变化。当二极管断开时,3.48 GHz 频点左移,4.04 GHz 频点右移,这是因为 W_2 可以同时控制左手电容和右手电感,也再次验证了该天线同时具有左手特性和右手特性。

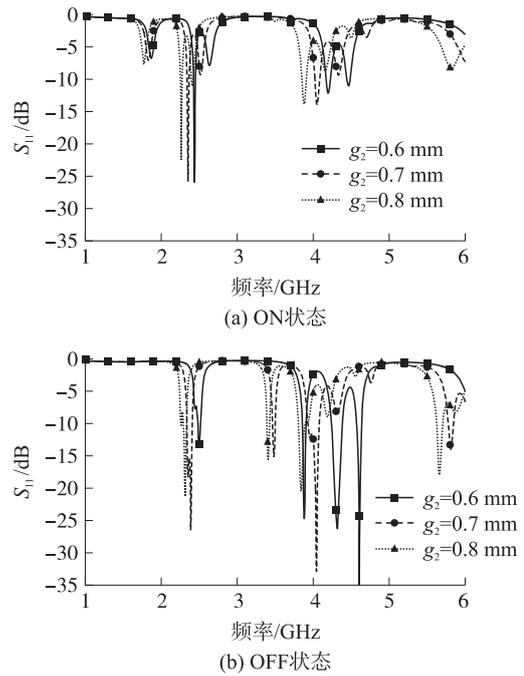


图 4 不同 g_2 参数天线的回波损耗

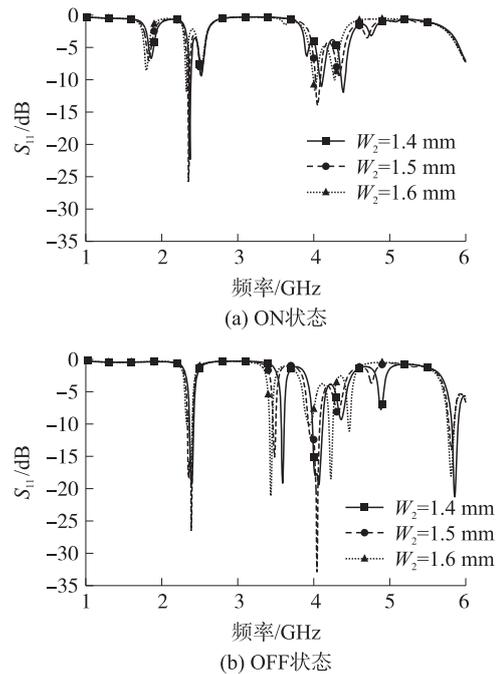


图 5 不同 W_2 参数天线的回波损耗

最后,为探讨 PIN 二极管所在位置对结果的影响,本文再对双螺旋结构和上部的金属贴片之间的间距 g_4 进行讨论,如图 6 所示。在二极管导通时,低频点没有明显的移动,高频点有明显的左移,这是因为右手电感的增大。在二极管断开时,第二个频点即 3.48 GHz 有明显的右移,这是因为左手电容的增大。

如上的参数扫描,利用 HFSS 仿真软件对天线的各个参数进行优化,最终天线的具体尺寸如表 1

所示。采用这样的尺寸,天线的性能达到最好。

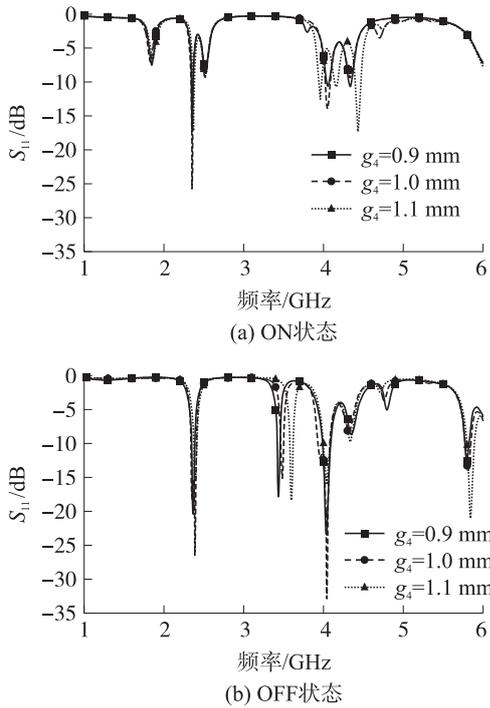


图 6 不同 g_4 参数天线的回波损耗

表 1 天线结构尺寸表 单位:mm

参数	数值	参数	数值
W	16.5	W_1	1
L	15.2	L_1	9.2
d	0.3	W_2	1.5
g_1	1.4	L_2	0.2
g_2	0.7	L_3	1
g_3	0.4	L_g	4
g_4	1		

2 天线的结构与分析

2.1 天线实物测试结果

本文设计的 WLAN 频段频率可重构复合左右手传输线天线的尺寸为 $0.129\lambda_0 \times 0.119\lambda_0 \times 0.013\lambda_0$ 。基板采用相对介电常数为 4.4 的 FR4 介质进行加工和测试。天线实物及测试结果如图 7 所示。分别测试当二极管开或关时回波损耗结果,用矢量网络分析仪进行测试,其中测量结果如图 8 所示。实测和仿真的结果没有百分之百重合,这是因为在实物加工时天线尺寸有微小的误差,且在测试时 SMA 接口有部分的电磁波泄漏。但总体看来无论是二极管导通时还是断开时,这两条回波损耗曲线图是基本重合的,再次验证了天线的准确性。

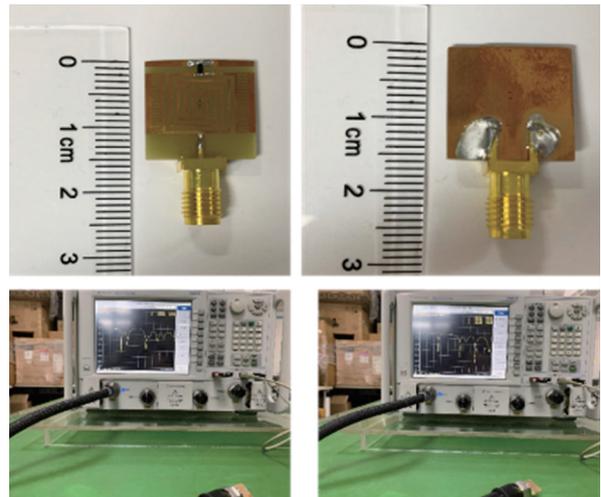


图 7 天线实物及测试环境

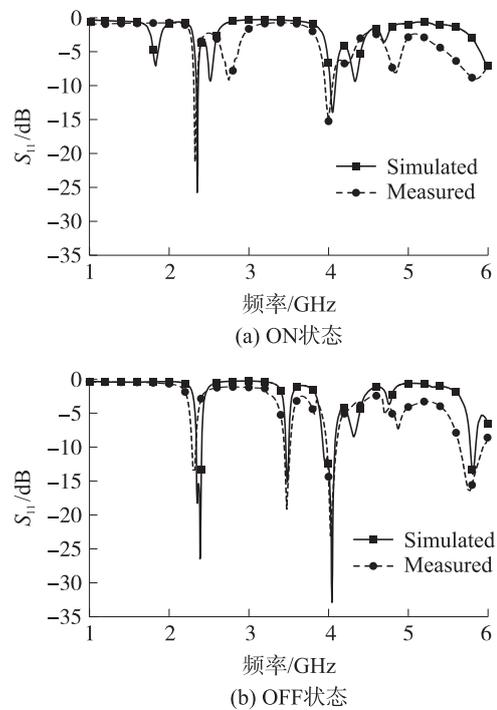
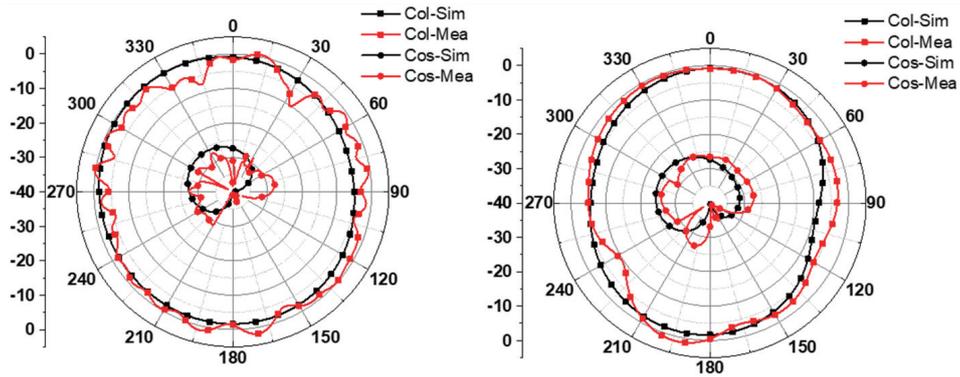


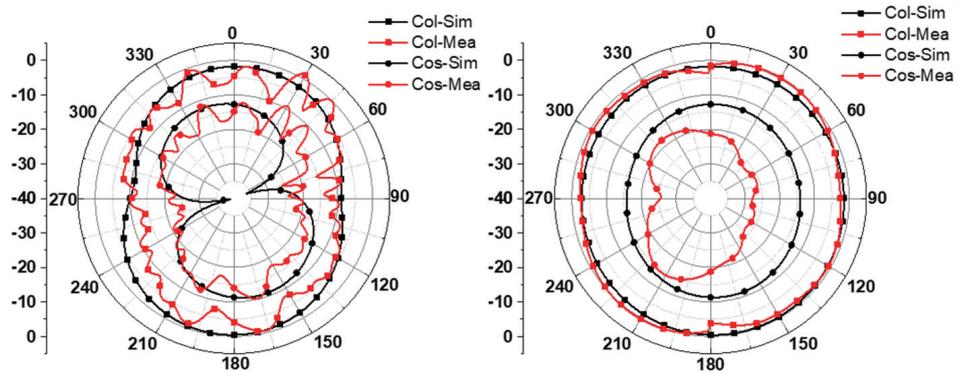
图 8 天线仿真和实测的回波损耗

2.2 天线的方向图

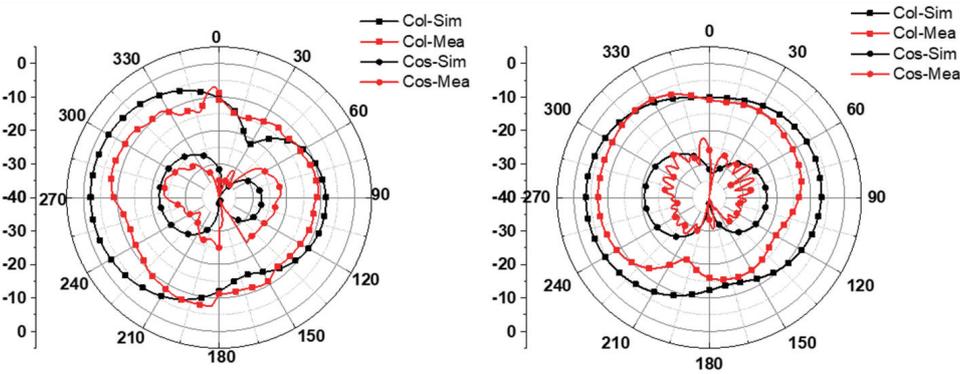
图 9 描绘了该天线当二极管导通时在 2.35 GHz、4.05 GHz 频点,当二极管断开时在 2.39 GHz、3.48 GHz、4.04 GHz 和 5.81 GHz 频点的三维辐射图。 XOZ 平面为 E 平面, YOZ 平面为 H 平面。 E 面和 H 面都具有几乎全向的辐射。被测图形的波纹可归因于馈电连接器的转换头有一定的电磁波泄漏,且由于实测设备限制,方向图的扫描分辨率为 7.5° ,与仿真时设置的 1° 有所差异,但总体的方向图是重合的。且交叉极化增益和主极化增益相差较多,因此交叉极化对天线的干扰可以几乎不计。



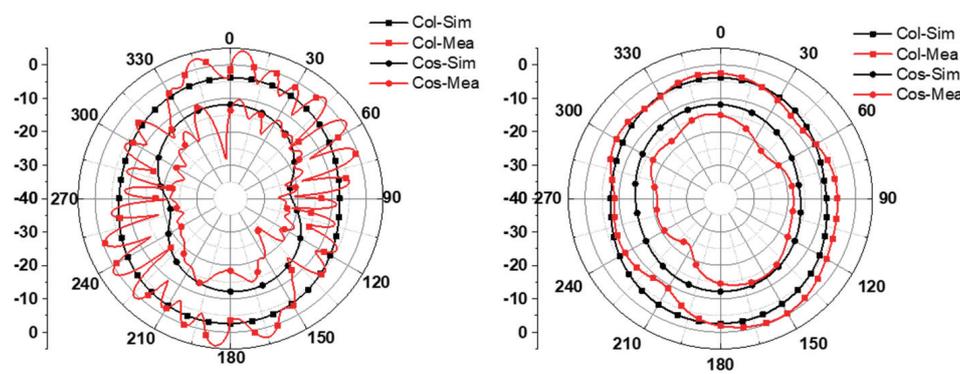
(a) ON状态时2.35 GHz



(b) ON状态时4.05 GHz



(c) OFF状态时2.39 GHz



(d) OFF状态时3.48 GHz

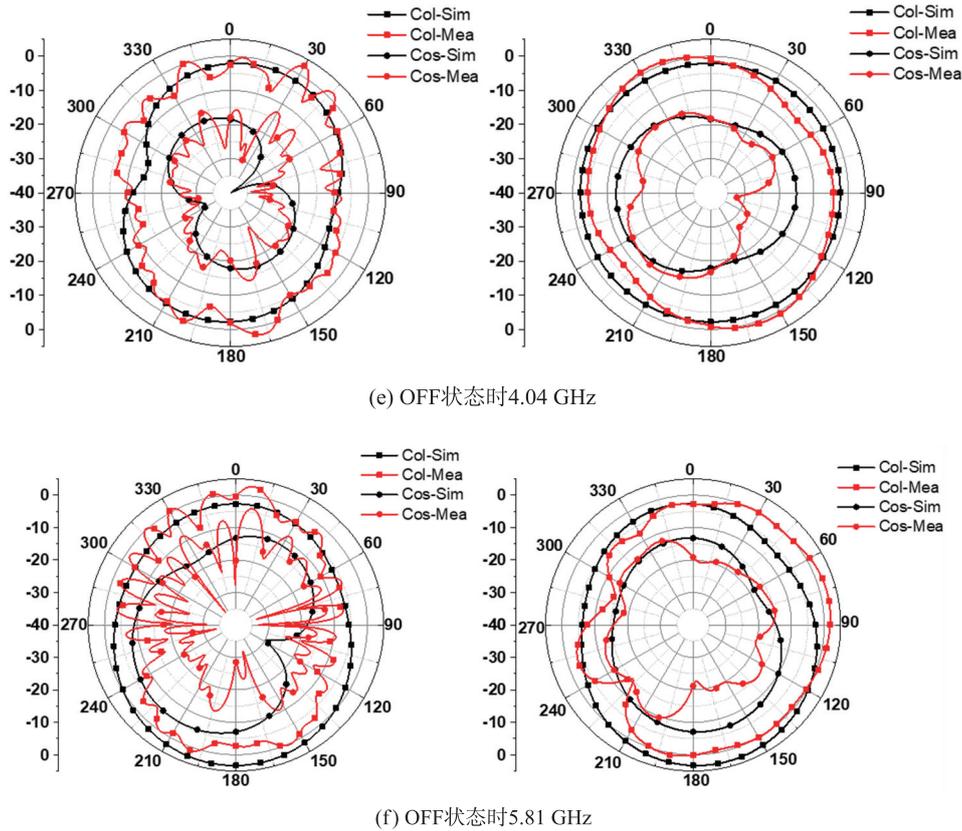


图 9 天线仿真和实测的方向图对比

表 2 是本文设计的紧凑型复合左右手传输线天线关键参数与文献[18-20]的对比表。表中调谐比为 f_{max}/f_{min} ，天线的工作频段都为 1 GHz~8 GHz，所

有设计的天线都是基于复合左右手传输线。

由表 2 可见，本文所设计的天线在尺寸上具有优势。

表 2 本文与近几年论文对比

参考文献	技术方式	天线尺寸	开关个数	转换率
This work	PIN diode	$0.129\lambda_0 \times 0.119\lambda_0 \times 0.013\lambda_0$	1	2.47:1
[18]	varactor	$0.078\lambda_0 \times 0.056\lambda_0 \times 0.008\lambda_0$	1	1.40:1
[19]	RF switch	$0.664\lambda_0 \times 0.664\lambda_0 \times 0.058\lambda_0$	6	1.39:1
[20]	varactor	$0.115\lambda_0 \times 0.118\lambda_0 \times 0.003\lambda_0$	2	1.65:1

3 结论

该天线是一种紧凑型 CRLH 传输线的频率可重构天线，由 π 型非谐振 CRLH 传输线单元加载。利用基于 CRLH 传输线理论的色散图分析了零阶谐振特征。通过控制 PIN 二极管开关，天线可以在双波段和四波段之间切换。测量结果回波损耗小于 -10 dB 的频点，分别为 2.35 GHz、4.05 GHz、2.39 GHz、3.48 GHz、4.04 GHz 和 5.81 GHz。所提出的紧凑型天线可应用于集成紧凑型无线通信系统中。

参考文献：

[1] 朱逸. 宽频带微波超材料吸收结构研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.

[2] Barth S, Smyth B P, Brown J A, et al. Theory and Design of Dual-Band Microstrip Networks Using Embedded Metamaterial-Based Electromagnetic Bandgap Structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 1761-1772.

[3] Lee H, Yang H, Myeong S, et al. Dual-Band MNG Patch Antenna for Smart Helmet[J]. Electronics Letters, 2018, 54(19): 1101-1102.

[4] 陈文健. 基于复合左右手传输线理论的小天线研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.

[5] 曹卫平, 刘晓倩, 李思敏, 等. 基于超材料的多波段小型化天线[J]. 电波科学学报, 2017, 32(6): 735-741.

[6] Lee H, Yang H, Myeong S, et al. Dual-Band MNG Patch Antenna for Smart Helmet[J]. Electronics Letters, 2018, 54(19): 1101-1102.

[7] 杨贝. 基于零阶谐振的小型化多频带/宽带天线设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.

[8] 耿林, 王光明, 张晨新, 等. 基于新型复合左右手传输线的零阶谐振天线[J]. 微波学报, 2012, 28(3): 17-20.

- [9] Chi P L, Shih Y S. Compact and Bandwidth-Enhanced Zeroth-Order Resonant Antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 285-288.
- [10] Lee H, Woo D J, Nam S. Compact and Bandwidth-Enhanced Asymmetric Coplanar Waveguide (ACPW) Antenna Using CRLH-TL and Modified Ground Plane [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015: 1-1.
- [11] Tao J, Feng Q, Zheng Z, et al. Compact Coplanar Epsilon-Negative Antenna with Ultra-Wide Band Character [J]. *China Communications*, 2017, 14(2): 49-56.
- [12] 王轶豪, 齐世山, 吴文, 等. Ku 波段新型双波束电控可重构反射阵天线 [J]. *微波学报*, 2017(S1): 46-49.
- [13] 史向柱, 刘少斌, 唐丹, 等. 基于 S-PIN 二极管的频率可重构天线设计 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(4): 657-660.
- [14] 邓楚虹. 差分频率可重构天线研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [15] 尹波, 于有海, 蔡旭. 非谐振型结构的复合左右手带通滤波器小型化设计 [J]. *电子器件*, 2019, 42(4): 942-946.
- [16] Lai A, Leong K M K H, Itoh T. Infinite Wavelength Resonant Antennas with Monopolar Radiation Pattern Based on Periodic Structures [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(3): 868-876.
- [17] Amani N, Jafargholi A. Zeroth-Order and TM modes in One-Unit Cell CRLH Mushroom Resonator [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1396-1399.
- [18] Khan M S, Capobianco A, Iftikhar A, et al. A Frequency-Reconfigurable Series-Fed Microstrip Patch Array with Interconnecting CRLH Transmission Lines [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 242-245.
- [19] Zhang J, Yan S, Vandenbosch G A E. Realization of Dual-Band Pattern Diversity with a CRLH-TL-Inspired Reconfigurable Metamaterial [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(10): 5130-5138.
- [20] Shahgholi A, Moradi G, Abdipour A. Low-Profile Frequency-Reconfigurable LTE-CRLH Antenna for Smartphones [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 26487-26494.



杨 虹(1966—),男,四川蓬溪人,教授,主要从事微电子学、电磁理论及应用方面的研究,2587410526@qq.com;



何 莉(1996—),女,重庆人,研究生,研究方向为微波电路、天线传播,1601555079@qq.com;



张红升(1980—),男,河南新野人,教授,主要从事数字多媒体广播 DAB/DMB 系统和芯片设计研究。