

# 基于负磁导率传输线的多模宽带天线设计

廖淑敏, 林辉, 苏晨, 郭恒, 李琦, 宋以祥

联想(上海)信息技术有限公司, 上海

收稿日期: 2023年10月28日; 录用日期: 2023年11月28日; 发布日期: 2023年12月8日

## 摘要

本文提出了一种基于人工负磁导率传输线以及多模式融合技术的天线设计, 实现了天线的多模、宽带性能。首先基于传统的环天线, 在该环天线的二次模对应的电流零点处引入分布式电容, 在不影响二次模谐振频率的情况下, 基模的谐振频率移动到更高频并与二次模相融合形成一个双模谐振。同时, 通过适当选择环天线尺寸及加载的电容值, 在所需频段内还产生了一个零模谐振点, 从而天线的零模、基模、二次模的谐振频率相互靠近并融合成一个多模谐振, 形成了覆盖WIFI 5G、6E频段(5.15~5.85 GHz, 5.925~7.125 GHz)的宽带。并且在不增加天线尺寸的情况下, 通过在传统环天线的中间加载一段感性枝节, 产生了WIFI 2.4G (2.4~2.485 GHz)低频谐振。最终, 该天线实现了WIFI 2.4G、5G和6E频段的全覆盖。

## 关键词

负磁导率传输线, 多模, 宽带

# Design of Multimode and Broadband Antenna Based on Mu-Negative Transmission-Line Structure

Shumin Liao, Hui Lin, Chen Su, Heng Guo, Qi Li, Yixiang Song

Lenovo (Shanghai) Information Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Oct. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 28<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 8<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

This article proposes an antenna design based on artificial Mu-negative transmission-line structure and multimode compression technology to achieve multimode and broadband performance of the antenna. Firstly, based on traditional loop antenna, distributed capacitors are introduced on the current nulls of the second mode of the loop antenna, without effecting the second resonance

mode, the fundamental mode moved to higher frequency band and compressed with the second mode, generating a dual-mode resonance. At the same time, by appropriately selecting the size of the loop antenna and the value of loaded capacitances, zeroth-order resonance is generated within the required frequency band, thus, the zeroth-order resonance, fundamental mode resonance, and second mode resonance of the antenna are compressed, generating a multi-mode resonance, which covers the WIFI 5G and 6E (5.15~5.85 GHz, 5.925~7.125 GHz) frequency bands. In addition, without adding additional space of the antenna, an inductive strip was loaded in the middle of the loop antenna, generating a lower resonance in WIFI 2.4G (2.4~2.485 GHz) band. Ultimately, the proposed antenna can operate in the whole WIFI 2.4G/5G/6E frequency bands simultaneously.

## Keywords

Mu-Negative Transmission-Line (MNG-TL), Multimode, Wideband

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着无线通信系统、卫星定位系统、无线探测系统等的快速发展,能够工作在较宽频率范围的宽频带天线和能够工作在多个不连续频段内的多频带天线成为了研究的热点。宽带天线可以在更广泛的频谱范围内工作,可以覆盖更多的频段,适应不同的通信制式,提高了通信的灵活性和可靠性。同时,由于宽带天线能够覆盖多个频段,减少天线数量,也可以避免多天线间的相互耦合干扰,从而减少了系统的成本并提高了系统的通信质量。

为了提高终端天线的带宽,多种技术被广泛的研究。如耦合馈电技术[1] [2] [3] [4],与直接馈电方式相比,耦合馈电可以使天线过大的输入阻抗匹配至合适的水平,同时使天线的端口输入阻抗在一个相对宽的频段内变化平缓,从而使天线阻抗在较宽的频段内实现匹配。电路匹配技术[5] [6] [7]是终端天线常用的展宽带宽的方法,指在天线的馈电端口加入离散元件如电感和电容,使天线在某些特定频段实现良好的阻抗匹配。频率可重构技术[8]也是展宽带宽尤其是低频段带宽的常用方式,是通过在天线的适当位置放置射频开关,根据实际应用的需求切换天线的工作状态,以实现不同频段的覆盖。

随着人们对超材料的研究不断深入,基于超材料的负磁导率传输线天线[9]-[15]也被广泛研究。如周期性容性加载形成人工 $\mu$ 负传输线(MNG-TL)结构[9] [10],在天线尺寸达到特定范围时传输线上电流仍然不会反向,从而负磁导率传输线天线可以用来改善天线的全向性。负磁导率传输线天线可以用来提高天线的辐射效率[11],通过优化天线的电流路径,提高天线的辐射电阻达到提高天线的效率。此外,负磁导率传输线也被用来增加天线的谐振点,展宽天线的带宽,同时实现天线特定的方向性[12] [13] [14] [15]。

本文基于人工负磁导率传输线以及多模式融合技术来实现天线的宽带特性,使天线的零模、基模、二次模三个模式的谐振频率相互靠近,形成了覆盖 WIFI 5G、6E 频段的宽带特性。同时,通过感性枝节加载引入一个低频 WIFI 2.4G 谐振,最终该天线能覆盖 WIFI 2.4G/5G/6E 全频段。

## 2. 天线设计原理

### 2.1. 负磁导率传输线天线

对于环天线模型,它可以等效为一段常规张开的传输线。对于常规无耗传输线模型,其等效电

路如图 1 所示, 可等效为串联电感与并联电容结合的结构。而负磁导率传输线是一种通过串联电容加载来获得等效负磁导率的传输线, 其中串联电容  $C_L$  称为左手电容。与传统环天线相比, 该天线加载了串联电容, 形成了人工负磁导率传输线(Mu-negative transmission-line, MNG-TL)结构, 从而产生零模谐振(zero-order-resonance, ZOR)。对于零模谐振( $\beta = 0, \omega \neq 0$ ), 天线的波长与物理尺寸没有直接对用关系, 即使天线的物理长度超过其工作波长的若干倍, 其上的电流都不会反向。利用其零传播常数的性质, 可以设计具有无限大波长且谐振频率与尺寸无关的谐振器, 同时可以实现天线的宽带化。

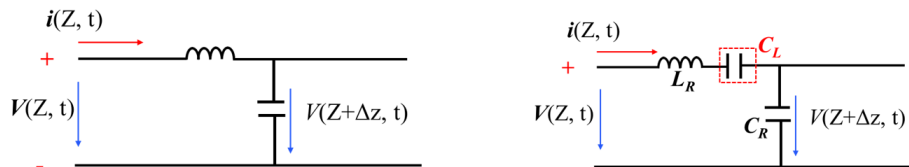


Figure 1. Equivalent circuit of right-hand transmission line (left) and negative permeability transmission line  
图 1. 右手传输线等效电路(左)及负磁导率传输线等效电路(右)

## 2.2. 模式融合技术

针对传统谐振式天线, 其存在主模与诸多高次模。随着通信系统对高性能、多功能、多通道天线性能的要求, 多模谐振技术被逐渐提出并广泛应用, 其核心思想是激励并调控多个谐振模以实现天线阻抗特性与辐射特性的提升。天线多模谐振技术在应用中也面临一些挑战, 如不同模式分布离散,  $N$  次模的谐振频率约为基模的  $N$  倍, 导致其谐振频率比大且相互关联。针对这一问题, 通过特殊位置加载来实现模式融合的思路被广泛研究。如采用短路针加载来改变低次模的场分布[16], 通过引入交指电容将低频谐振往高频移动[17]。如图 2 所示为传统环天线, 其基模对应的电流零点在环中心  $1/2$  等分点位置处, 而二次模对应的电流零点为距离馈电点  $1/4$  等分点位置处。利用此特点, 在二次模对应的电流零点位置(红色圆圈)加载串联电容, 此时二次模对应的谐振点几乎不受影响, 而基模随着加载电容值的不同可以在较大范围内移动, 从而使基模移动到二次模附近, 与二次模相融合, 从而形成一个双模谐振。利用此思想, 可以实现更多模式的融合, 从而得到更宽的带宽。

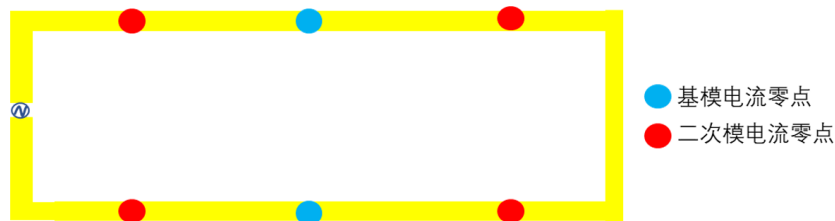


Figure 2. Current nulls of the loop antenna in first and second modes  
图 2. 环天线的基模和二次模的电流零点

## 3. 天线设计过程及原理分析

为了更好的理解和分析本文所提出的天线, 对天线的设计过程及原理进行了详细的分析。包括天线结构的变化过程, 阻抗匹配情况, 对应的电流分布及工作模式等。

### 3.1. 参考天线 A 及其特性

图 3 所示为原始的环天线, 记为参考天线 A, 该环天线的基底为 FR4, 介电常数为 4.4, 厚度为 0.8 mm,

仿真过程中该环天线采用 50 ohm 的离散端口馈电。由参考天线 A 对应的反射系数可以看到，该环天线在所频段内有两个谐振点，分别是 3.8 GHz 和 7.2 GHz。图 4 为两个谐振点对应的电流分布。由 3.8 GHz 谐振点对应的电流分布可知，此时参考天线 A 有两个电流零点，位于该环天线的中间位置，对应参考天线 A 的  $1\lambda$  工作模式。由 7.2 GHz 谐振点对应的电流分布知该谐振点有四个电流零点，对应参考天线 A 的  $2\lambda$  工作模式。

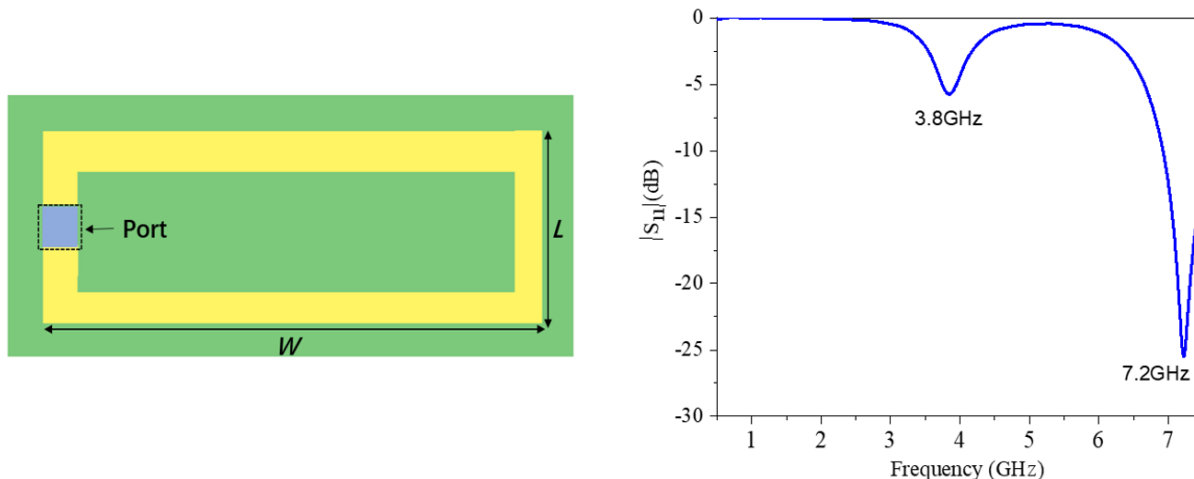


Figure 3. Referenced antenna A and its reflection coefficient  
图 3. 参考天线 A 及其反射系数

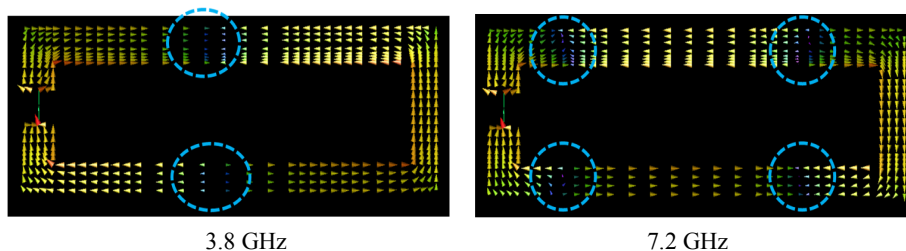


Figure 4. Current distribution of reference antenna A in 3.8 and 7.2 GHz  
图 4. 参考天线 A 在 3.8 和 7.2 GHz 的电流分布

### 3.2. 参考天线 B 及其特性

由于参考天线 A 的  $1\lambda$  模式和  $2\lambda$  工作模式对应的谐振点分别为 3.8 GHz 和 7.2 GHz，二次模对应的谐振点频率约为基模谐振点的 2 倍，因此为了使两个模式对应的谐振点靠近形成宽带特性，故在二次模的四个电流零点处引入了四个大小相同的断缝，如图 5 所示形成了参考天线 B，参考天线 B 可等效为参考天线 A 引入了四个串联电容。此时天线 B 对应的反射系数如图 5，在所频段内共产生了 3 个谐振点，分别为 5.1 GHz、6.5 GHz 和 7.2 GHz。图 6 为该 3 个谐振点对应的电流分布，由 5.1 GHz 对应的电流分布可知，此时天线没有电流零点，工作在零模谐振模式，此模式由负磁导率传输线天线特性所产生。6.5 GHz 和 7 GHz 的电流分布分别有两个电流零点和四个电流零点，对应环天线的基模谐振和二次模谐振。对比参考天线 A 和 B 的基模谐振点和对应的电流分布可知，加载的串联电容将基模谐振点由 3.8 GHz 提升至 6.5 GHz，使其与二次模相互融合，从而展宽了天线带宽。同时，零模谐振的引入，使得参考天线 B 的零模、基模和二次模相互融合，进一步提升了天线带宽。

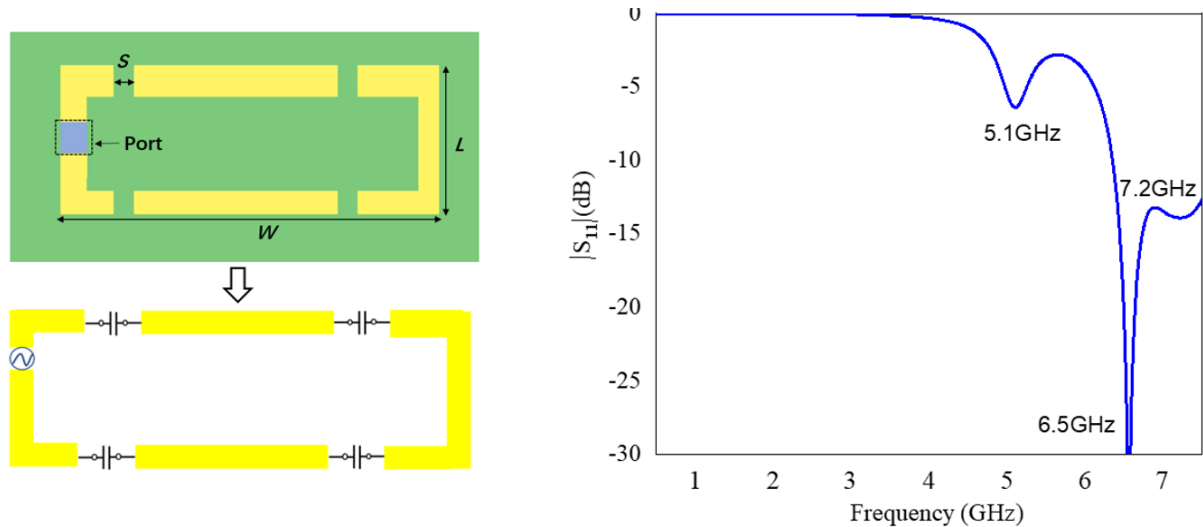


Figure 5. Referenced antenna B and its reflection coefficient  
图 5. 参考天线 B 及其反射系数

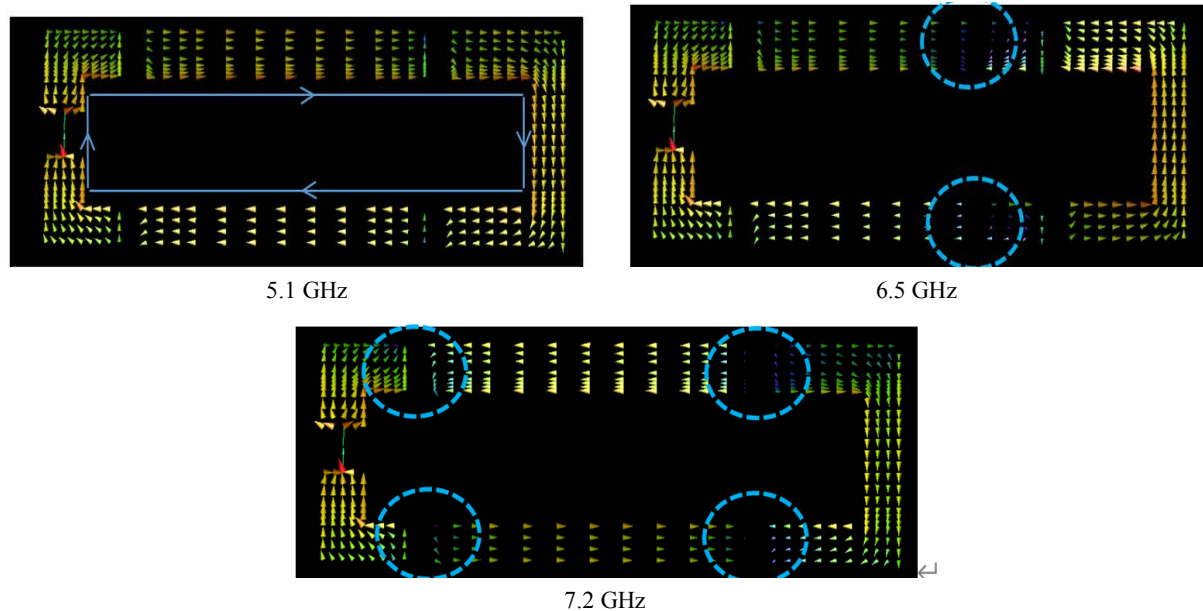
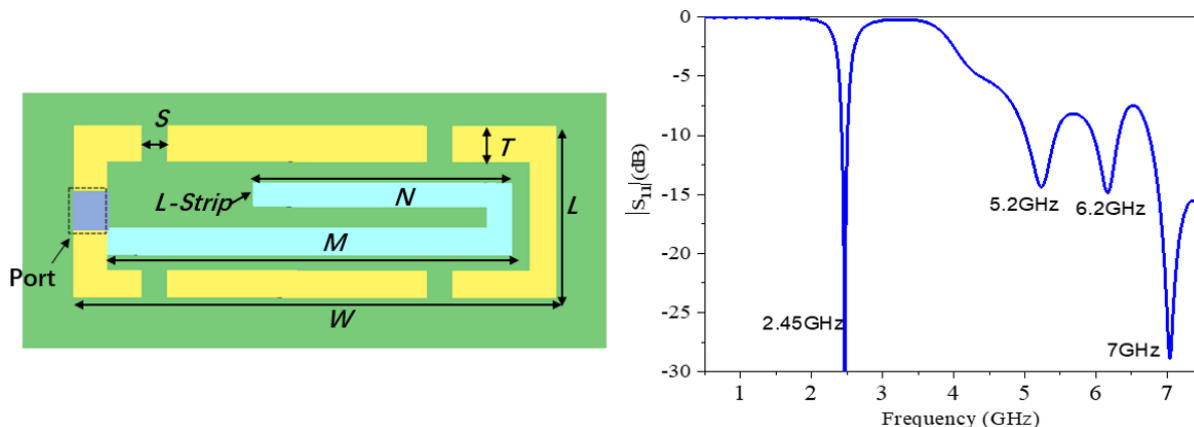


Figure 6. Current distribution of reference antenna B in 5.1, 6.5 and 7.2 GHz  
图 6. 参考天线 B 在 5.1、6.5 和 7.2 GHz 的电流分布

### 3.3. 本文天线设计

除了 5G 和 6E 频段, 2.4 G 频段是 WIFI 非常重要的频段。因此, 为了覆盖 WIFI 2.4G 频段, 在环的内部加载了一个 L 形感性耦合枝节, 如图 7 所示。该 L 形枝节为单极子(monopole)天线形式, 对应 2.4G 半波长谐振模式, L 形枝节的弯折结构对天线的整体尺寸有小型化作用。由对应的反射系数图可知: 加载了 L 形枝节后, 天线在所带内共产生了四个谐振点, 分别是 2.45、5.2、6.2 和 7 GHz。对比加载 L 形枝节前后的反射系数可知, 2.45 GHz 处谐振为 L 形枝节产生, 该谐振能够覆盖 2.4 GHz~2.485 GHz 频段。同时, L 形枝节的引入对天线高频的阻抗匹配有调节作用, 改善了 WIFI 5G & 6E 频段的阻抗匹配特性。天线对应的参数信息如表 1 所示, 可知该天线的整体尺寸为 28 mm × 9.5 mm。



**Figure 7.** The proposed antenna and its reflection coefficient  
**图 7.** 本文设计的天线及其反射系数

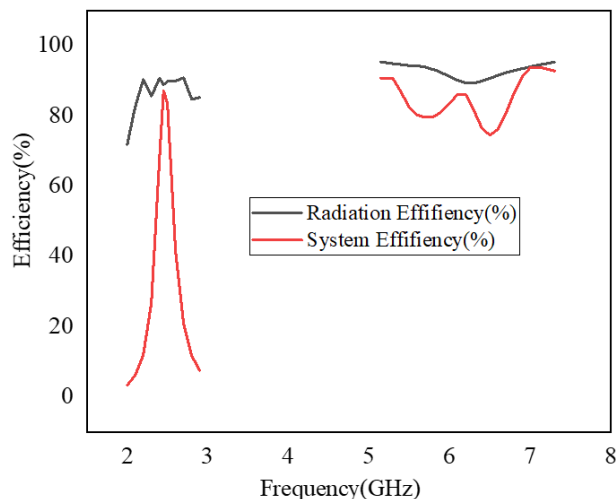
**Table 1.** Design parameters of the antenna  
**表 1.** 天线尺寸参数

参数	$W$	$L$	$T$	$M$	$N$	$S$
数值(mm)	28	9.5	2	25.4	15	1.4

图 8 为最终天线对应的效率，由图知天线在所需带内的系统效率大于 80%，表明该天线具有较好的辐射能力。图 9 为该天线的四个谐振点对应的电流分布，图 9 表明 2.45 GHz 处谐振为 L 形枝节对应的半波模式产生。而 5.2、6.2 和 7 GHz 三个谐振点的电流分布分别对应环天线的零模、基模以及二次模谐振，其电流分布与参考天线 B 对应的三个谐振点电流分布接近。同时，L 形枝节的引入对另外三个高频谐振点的谐振及电流分布影响较小。综上，通过融合天线的零模、基模和二次模，以及加载 L 形感性枝节，该天线最终可以覆盖 WIFI 2.4G /5G/6E 全频段。

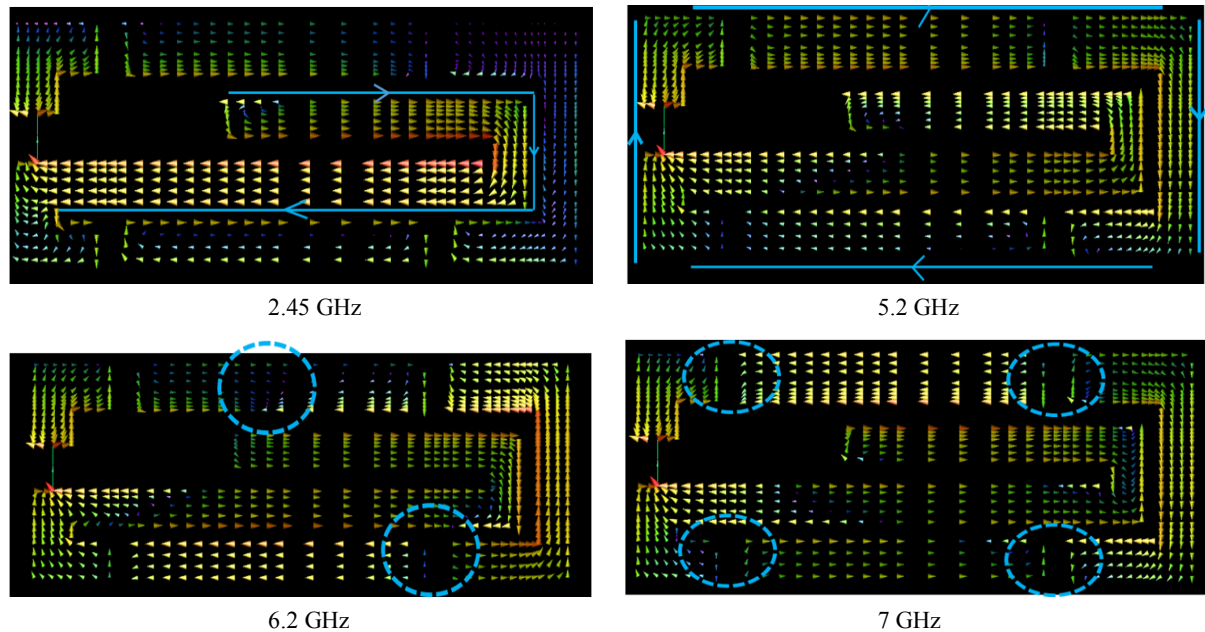
### 3.4. 天线实物测试结果

为了进一步验证仿真结果，制作了天线实物，天线采用同轴线进行馈电，天线介质板材为 0.8 mm 的 FR4。



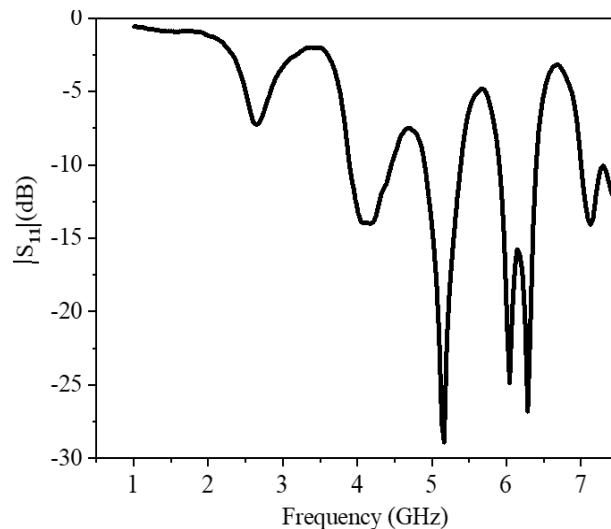
**Figure 8.** System efficiency of the proposed antenna  
**图 8.** 本文天线的辐射效率





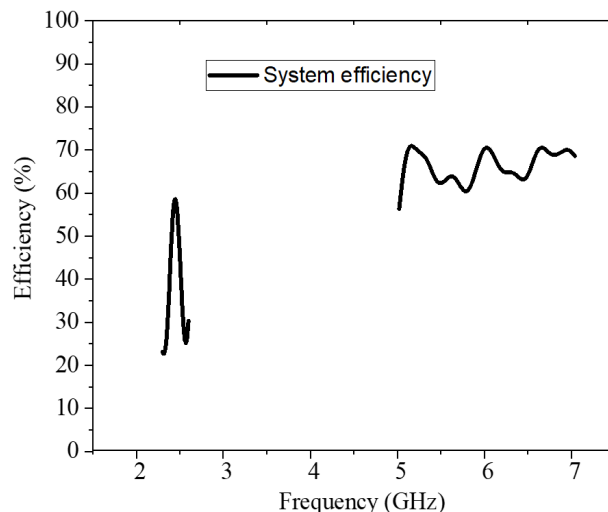
**Figure 9.** Current distribution of the proposed antenna in 2.45, 5.2, 6.2 and 7 GHz, respectively  
**图 9.** 本文天线在 2.45、5.2、6.2 和 7 GHz 的电流分布

天线的近场反射系数是在 Keysight E5071C 网络分析仪上进行测试的，实测的反射系数如图 10 所示，和仿真的反射系数对比可知：天线仿真与实测的谐振点基本吻合，实测的 2.4G 谐振点深度较仿真变差，且略有频偏，原因是 cable 线的引入(cable 线约 85 mm)使得原始天线的参考地发生了变化，导致天线的阻抗匹配变差，实际应用中天线尺寸可根据具体环境进行微调已达到所需频段的覆盖。图 11 为天线实测的效率，该项测试在 GTS2800 暗室进行，由图知 2.4 G 频段的系统效率约为 50%~60%，5G/6E 频段的系统效率约为 60%~70%。实效率较仿真效率有所变差，原因是加工误差以及 cable 线引入的损耗，以及测试过程中存在损耗及偏差。



**Figure 10.** The measured reflection coefficient of the proposed antenna

**图 10.** 天线实测的反射系数



**Figure 11.** The measured system efficiency of the proposed antenna

**图 11.** 天线实测的系统效率

#### 4. 结论

本文基于负磁导率传输线(MNG-TL)以及模式融合技术,提出了一种多模宽带小型化天线设计思路,在原始环天线的二次模电流零点处通过断缝引入分布式电容,使基模的谐振频率往高频移动并与二次模相融合形成双模谐振。同时,通过适当选择环天线尺寸及加载的电容值,形成了具有负磁导率的传输线,在所需频段内产生了一个零模谐振点,从而天线的零模、基模、二次模的谐振频率相互靠近并融合成一个多模谐振。同时,在不增加天线尺寸的情况下,在原始环天线的中间加载一段感性枝节,产生了 WIFI 2.4G 低频谐振。最终,该天线覆盖了 2.4~2.485 GHz、5.15~5.85 GHz 和 5.925~7.125 GHz。本文设计的宽带天线为天线实现宽带提供了有效思路。

#### 参考文献

- [1] Dutta, D., Guha, D. and Kumar, C. (2023) A Concept of Advanced Design Governed by Theoretically Predicted Current Distributions on the Ground Plane Beneath an Aperture-Fed Microstrip Antenna. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, **4**, 461-471. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2023.3267299>
- [2] Wong, K.L. and Chen, Y.C. (2015) Small-Size Hybrid Loop/Open-Slot Antenna for the LTE Smartphone. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **63**, 5837-5841. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2478960>
- [3] Ban, Y.L., Liu, C.L., Li, L.W., Guo, J. and Kang, Y. (2013) Small-Size Coupled-Fed Antenna with Two Printed Distributed Inductors for Seven-Band WWAN/LTE Mobile Handset. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 5780-5784. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2279427>
- [4] Ren, A., Yu, H., Yang, L., Huang, Z., Zhang, Z. and Liu, Y. (2023) A Broadband MIMO Antenna Based on Multimodes for 5G Smartphone Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **22**, 1642-1646. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3257182>
- [5] Xu, Z., Zhou, Q., Ban, Y. and Ang, S.S. (2018) Hepta-Band Coupled-Fed Loop Antenna for LTE/WWAN Unbroken Metal-Rimmed Smartphone Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **17**, 311-314. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2787863>
- [6] Shahgholi, A., Moradi, G. and Abdipour, A. (2020) Low-Profile Frequency-Reconfigurable LTE-CRLH Antenna for Smartphones. *IEEE Access*, **8**, 26487-26494. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971518>
- [7] Wong, K. and Tsai, C. (2016) IFA-Based Metal-Frame Antenna without Ground Clearance for the LTE/WWAN Operation in the Metal-Casing Tablet Computer. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **64**, 53-60. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2503420>



- 
- [8] Xu, Z.-Q., Sun, Y., Zhou, Q.-Q., Ban, Y.-L., Li, Y.-X. and Ang, S.S. (2017) Reconfigurable MIMO Antenna for Integrated-Metal-Rimmed Smartphone Applications. *IEEE Access*, **5**, 21223-21228. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2757949>
- [9] Wei, K., Zhang, Z., Feng, Z. and Iskander, M.F. (2013) A Wideband MNG-TL Dipole Antenna with Stable Radiation Patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 2418-2424. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2241717>
- [10] Wei, K., Zhang, Z., Zheng, F. and Iskander, M.F. (2012) An MNG-TL Loop Antenna Array with Horizontally Polarized Omnidirectional Patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 2702-2710. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194643>
- [11] Lee, S.W. and Lee, J.H. (2010) Electrically Small MNG ZOR Antenna with Multilayered Conductor. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **9**, 724-727. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2057403>
- [12] Bilotti, F., Alù, A. and Vegni, L. (2008) Design of Miniaturized Metamaterial Patch Antennas with  $\mu$ -Negative Loading. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **56**, 1640-1647. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.923307>
- [13] Wang, Z., Ning, Y. and Dong, Y. (2022) Hybrid Metamaterial-TL-Based, Low-Profile, Dual-Polarized Omnidirectional Antenna for 5G Indoor Application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **70**, 2561-2570. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3137242>
- [14] Mehdipour, A., Denidni, T.A. and Sebak, A.-R. (2013) Multi-Band Miniaturized Antenna Loaded by ZOR and CSRR Metamaterial Structures with Monopolar Radiation Pattern. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **62**, 555-562. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2290791>
- [15] Soric, J.C., Engheta, N., Maci, S. and Alu, A. (2013) Omnidirectional Metamaterial antennas Based on  $\epsilon$ -Near-Zero Channel Matching. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 33-44. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2214994>
- [16] Wu, J., Ren, X., Wang, Z. and Yin, Y. (2014) Broadband Circularly Polarized Antenna with L-shaped Strip Feeding and Shorting-Pin Loading. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **13**, 1733-1736. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2354050>
- [17] Li, H. and Li, Y. (2020) Mode Compression Method for Wideband Dipole Antenna by Dual-Point Capacitive Loadings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **68**, 6424-6428. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2972642>