

单方环结构左手材料微带天线*

郭林燕 杨河林[†] 李敏华 高超嵩 田原

(华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079)

(2011年3月6日收到; 2011年5月7日收到修改稿)

设计了一种简单的双面单方环结构左手材料, 在 4.8—5.25 GHz 频率范围内该材料的等效介电常数和等效磁导率同时为负. 将此单方环左手材料作为覆盖层, 置于中心工作频率为 5.0 GHz 的微带天线之上. 仿真和实验研究表明: 相对普通微带天线而言, 覆层微带天线的性能得到了明显改善, E 面和 H 面的半功率波束宽度分别收缩了 25° 和 20° , 定向性得到了提高, 5 GHz 处的增益提高了 3 dB, -10 dB 带宽增加了 600 MHz.

关键词: 单方环结构, 左手材料, 微带天线

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 77.22.Ch, 84.40.Ba

1 引言

众所周知, 1968 年 Veselago 提出了同时具有负介电常数和负磁导率的左手材料的概念^[1], Pentry^[2,3] 提出金属线和开缝谐振环组成的人工媒质, 其等效介电常数和等效磁导率可为负值, Smith^[4] 根据这一模型构建了世界上第一块介电常数和磁导率同时为负的人造左手材料. 近十多年来, 研究左手材料的电磁特性以及应用受到普遍关注, 已渗透到了各类微波器件的设计和应用中^[5-8].

微带天线由于其剖面薄、体积小、重量轻、平面结构等优势, 运用于飞机、卫星、民用通信等广泛的领域. 但由于微带天线的频带窄、增益低、损耗较大、方向性较差的缺点影响了其应用的领域. 将左手材料用于微带天线能有效地抑制微带天线基板所产生的表面波, 减少天线的副瓣和后瓣, 改善其性能^[9,10]. Oh 等^[11] 将周期性排列的金属开口谐振环 (SRRs) 阵列加载在天线的基板之上, 利用开口谐振环有效地抑制了天线的表面波, 从而改善天线的性能. 朱忠奎等^[12] 设计了一种树枝状金属结构单元阵列的负磁导率材料作为微带天线的基板, 研究发现树枝状金属结构微带天线的性能明显优于普通微带天线. 武明峰等^[13] 实现了基于

左手材料后向波的小型化天线. Yang 等^[14] 则提出了具有主瓣宽度窄、仰角低特点的左手材料微带天线.

根据左手材料实现原理, 本文提出了结构更加简单的双面单方环结构左手材料^[15,16], 使用 CST Microwave Studio 软件对其进行了优化设计, 并进行实验测试, 通过电磁参数反演证实该结构具有左手特性. 将其覆盖在微带天线的上方作为覆盖层, 仿真和实验结果表明, 该结构左手材料覆层能够有效地改善微带天线的性能.

2 单方环结构左手材料

构建的一种在介质基板的双面覆有单方环结构铜环的周期性排列材料, 单元结构如图 1(a) 所示. 介质基板采用 $a_x = a_y = 10$ mm、厚度为 $t = 1$ mm 的 FR4 环氧板 ($\epsilon = 4.0$, $\tan \delta = 0.015$). 基板上阴影部分的正方形单环结构为纯铜, 铜的电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m, 厚度 $30 \mu\text{m}$, 外边长为 $b_x = b_y = 7.8$ mm, 铜环宽 $w = 0.6$ mm, 基板两侧的铜环结构严格对齐. 入射电磁波沿 z 轴反方向入射到材料表面, 电场极化方向在 y 方向. 材料模型如图 1(b) 所示.

* 中央高校基本科研业务费 (批准号: CCNU10A02021) 资助的课题.

[†] E-mail: hlyang@phy.ccnu.edu.cn

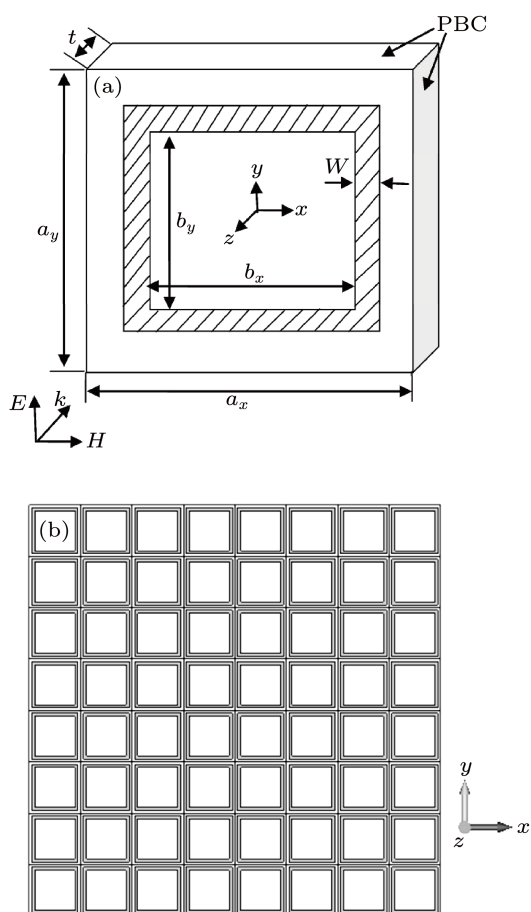


图1 双面单方环结构左手材料示意图 (a) 单元结构; (b) 材料模型

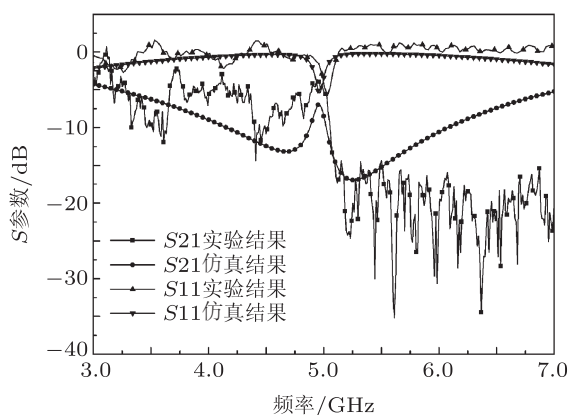


图2 左手材料 S 参数的实验与仿真结果对比

用印制电路板 (printed circuit board, PCB) 工艺制作单方环结构测试样品 (即在 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 1\text{ mm}$ 环氧板的双面刻蚀了周期性排列的 15×15 个 $30\text{ }\mu\text{m}$ 厚的铜环). 利用自由空间法, 用 Agilent 公司生产的型号为 PNA E8362B 矢量网络分析仪连接两个双脊喇叭天线, 对实验样品的 S 参数进行测量 [17,18]. 仿真与实验对比结果如图 2 所示.

由图 2 看出, 在 4.96 GHz 附近有一个传输通带, 且实验与仿真的结果基本符合, 在同一频率点达到最大值. 利用 S 参数反演电磁参数算法 [19], 得到双面单方环结构材料的等效介电常数、磁导率、阻抗和折射率随频率变化曲线如图 3 所示. 由图 3(a) 和 (b) 可以看出, 在 4.8 GHz 以上频段内等效介电常数是负的, 而在 $4.8\text{—}5.25\text{ GHz}$ 频段内等效磁导率是负的, 且介电常数为负的频段相比磁导率的宽很多. 因此, 图 3(d) 中, 在 $4.8\text{—}5.25\text{ GHz}$ 处材料的等效介电常数和等效磁导率同时是负的. 这说明, 在此频段内双面单方环结构材料是左手材料.

3 左手材料覆层微带天线

3.1 微带天线的设计

设计中心工作频率在 5.0 GHz 的普通微带天线结构如图 4(a) 所示: 介质基板的尺寸 $L_1 \times W_1 = 50\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 厚度 $T = 1\text{ mm}$, 背面金属接地板与介质板面积相同, 辐射贴片尺寸 $L_2 \times W_2 = 15\text{ mm} \times 13.5\text{ mm}$, 微带馈线的尺寸 $L_3 \times W_3 = 15\text{ mm} \times 2.1\text{ mm}$, 馈线位置 $W_4 = 14.5\text{ mm}$, 辐射贴片的位置 $W_5 = 12.5\text{ mm}$. 用 3×4 个图 1(a) 的单元结构作为覆盖层, 垂直置于普通微天线的上方, 间距 1.8 mm , 实物图如图 4(b) 所示.

3.2 结果与分析

覆层微带天线的 Q 值较小, 辐射能力比普通微带天线强, 能够达到展宽微带天线频带的目的 [20]. 同时利用左手材料覆盖层的平板聚焦特性, 将左手材料作为微带天线的覆盖层, 来提高天线的方向性. 利用左手材料对倏逝波进行放大, 放大较弱的电磁信号, 从而提高天线的增益 [21,22]. 因此, 针对天线的带宽、方向性和增益三者进行研究.

图 5 显示了用于对比的普通微带天线与覆层微带天线 S 参数仿真与实验结果, 普通微带天线的 -10 dB 带宽为 240 MHz , 而覆层天线的为 840 MHz , 相比普通天线, 后者增加了 600 MHz 的带宽. 由此可见, 左手材料覆层的合理应用, 可以增加普通微带天线的带宽. 相比叠层结构微带天线, 左手材料覆层微带天线的只有两层, 厚度更薄, 更加适合与各种电子系统外壳的共形应用 [23].

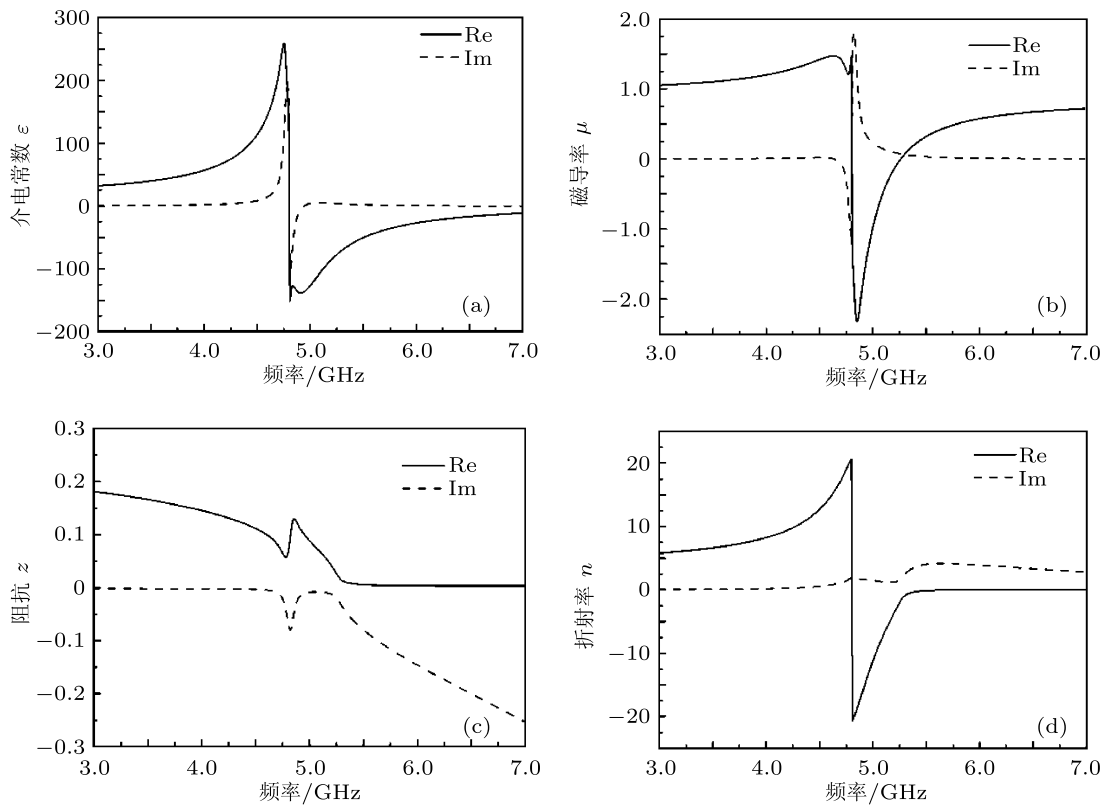


图3 S参数反演结果 (a) 等效介电常数; (b) 等效磁导率; (c) 等效阻抗; (d) 折射率

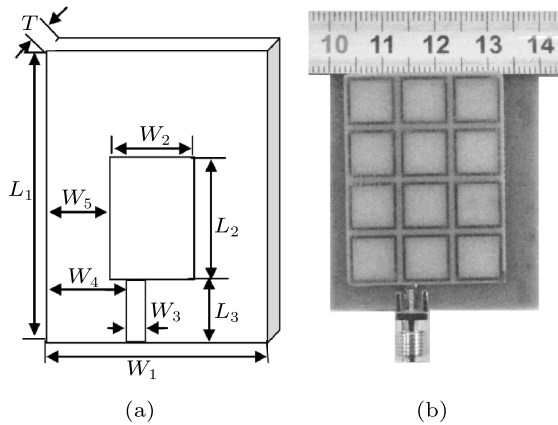


图4 (a) 普通微带天线结构示意图; (b) 覆层微带天线实物图

图6为左手材料覆层微带天线与普通微带天线的远场方向图在5.0 GHz处的实验对比结果,其中,图6(a)为E面方向图,图6(b)为H面方向图.从图中可以看出,在普通微带天线上加一层单方环结构左手材料覆盖层后,E面方向图的主瓣半功率波束宽度从80°下降到55°,共减小了25°;H面方向图的主瓣半功率波束宽度从85°下降到65°,共

减小了20°.由此可见,单方环结构左手材料覆层对普通微带天线有着汇聚的作用,使天线辐射的能量更集中.

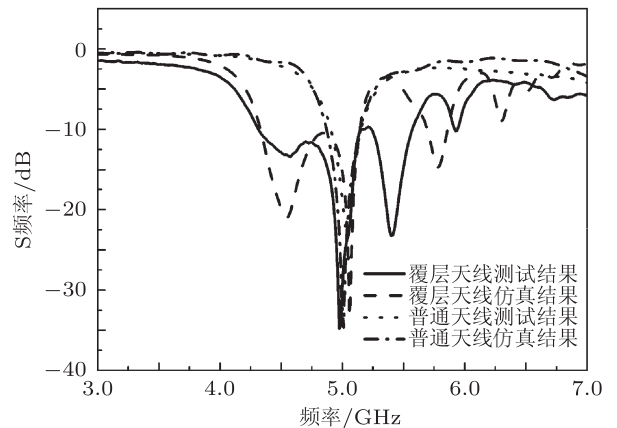


图5 普通天线与覆层天线的S参数仿真、实验结果对比

图7是覆层微带天线的电压驻波比和增益的仿真结果.由图7(a)可见,在4.3—5.1 GHz频段内覆层天线的驻波比仿真结果都是小于2的,即在该频段内覆层天线与馈源是匹配的.在该频段内取9个点,覆层天线的增益如图7(b)所示,都在5 dB以

上, 最大增益达到 7.13 dB, 5.0 GHz 处的增益相比原始微带天线提高了 3 dB. 可见, 左手材料覆盖上层的合理利用可以增加普通微带天线的增益, 同时使得在 -10 dB 的宽频带内天线与馈源都是匹配的.

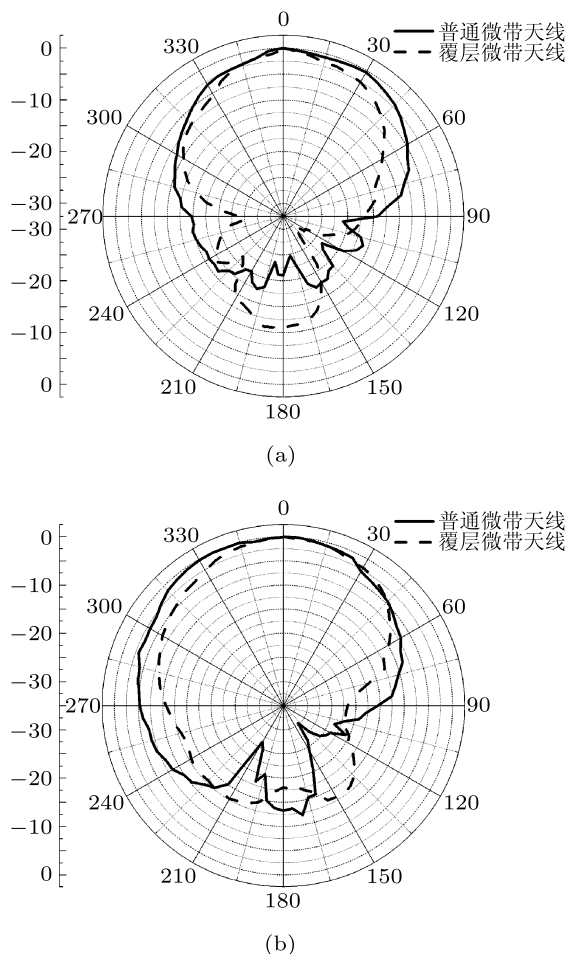


图6 原始天线与覆层天线在 5.0 GHz 处的远场方向图实验结果对比 (a)E 面; (b)H 面

4 结论

提出双面单方环结构的左手材料模型, 用数值

仿真方法模拟该结构左手材料对普通微带天线性能的影响, 并进行了实验验证. 研究表明, 当单方环左手材料作为普通微带天线的覆盖层时, 天线的 -10 dB 带宽增加了 600 MHz, 5.0 GHz 处的增益增加了 3 dB, E 面和 H 面半功率波束宽度分别减小了 25° 和 20°. 这说明单方环左手材料对普通微带天线的性能改善起了很大的作用, 可以对电磁波束汇聚, 提高方向性, 并且增加增益和带宽.

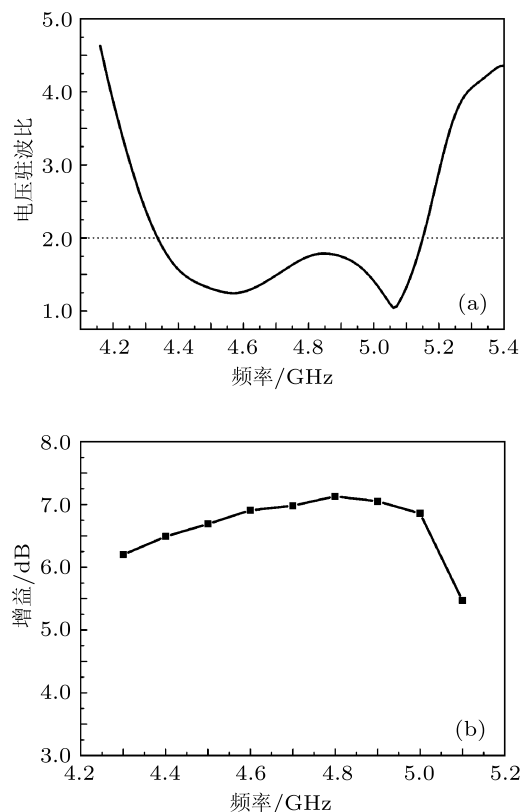


图7 覆层天线的驻波比和增益的仿真结果 (a) 驻波比; (b) 增益

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Younger I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2057
- [4] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [5] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Kong J A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 151909
- [6] Wang H X, Lü Y H, Zhang H X, Wu Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034101 (in Chinese) [王海侠, 吕英华, 张洪欣, 吴艳琳 2011 物理学报 **60** 034101]
- [7] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny Th, Soukoulis C M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [8] Wu Q, Meng F Y, Fu J H, Li L W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2180 (in Chinese) [吴群, 孟繁义, 傅佳辉, 李乐伟 2008 物理学报 **57** 2180]
- [9] Burokur S N, Latrach M, Toutain S 2005 *IEEE Antenn. Wireless Propag. Lett.* **4** 183
- [10] Alici K B, Ozbay E 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 083104

- [11] Oh S S, Shafai L 2006 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **48** 329
- [12] Zhu Z K, Luo C R, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6152 (in Chinese) [朱忠奎, 罗春荣, 赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 6152]
- [13] Wu M F, Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6368 (in Chinese) [武明峰, 孟繁义, 吴群, 吴健 2006 物理学报 **55** 6368]
- [14] Yang R, Xie Y J, Wang P, Li L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 064108
- [15] Li L W, Li Y N, Tat S Y, Juan R, Olivier J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 164101
- [16] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Gu C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3224 (in Chinese) [王甲富, 屈绍波, 徐卓, 张介秋, 马华, 杨一鸣, 顾超 2009 物理学报 **58** 3224]
- [17] Bayindir M, Aydin K, Ozbay E, Markos P, Soukoulis C M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 120
- [18] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5715 (in Chinese) [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 5715]
- [19] Smith D R, Vier D C, Koschny Th, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [20] Li J, Ding J, Guo C J, Xu Q 2010 *Electron. Compon. Mater.* **29** 47 (in Chinese) [李靖, 丁君, 郭陈江, 徐千 2010 电子元件与材料 **29** 47]
- [21] Ji N, Zhao X P 2010 *Comput. Simul.* **27** 102 (in Chinese) [纪宁, 赵晓鹏 2010 计算机仿真 **27** 102]
- [22] Bao S, Luo C R, Zhao X P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014101 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 赵晓鹏 2011 物理学报 **60** 014101]
- [23] Kiang J F 1996 *IEEE Proc. Microw. Anten. Propag.* **143** 107

A microstrip antenna with single square ring structured left-handed metamaterial*

Guo Lin-Yan Yang He-Lin[†] Li Min-Hua Gao Chao-Song Tian Yuan

(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

(Received 6 March 2011; revised manuscript received 7 May 2011)

Abstract

A simple structured left-handed metamaterials composed of single square ring cell is fabricated. Its permittivity and permeability are simultaneously negative in 4.8–5.25 GHz. A 5.0 GHz microstrip antenna is proposed, and we use this single square ring structured left-handed metamaterials (SSR-LHMs) as covering layer. Simulation and experiment results show that compared with conventional microstrip antenna, the performance of the new microstrip antenna with SSR-LHMs has been improved remarkably. The -3 dB beam of E -plane and H -plane can be reduced respectively by 25° and 20° , so the directional property of the antenna is enhanced. The gain is improved by 3dB and the -10 dB bandwidth is increased by 600 MHz.

Keywords: single square ring structure, left-handed metamaterials, microstrip antenna

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 77.22.Ch, 84.40.Ba

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. CCNU10A02021).

[†] E-mail: hlyang@phy.ccnu.edu.cn