

基于螺旋谐振环结构的微带天线小型化研究

刘海燕,熊伟,廖斌

(华东师范大学信息学院电子系,上海 200241)

摘要 研究了一种微带天线小型化的新方法。通过在介质中填充螺旋谐振环(SR)实现了负磁导率(μ -negative)的Meta材料,可使低频天线小型化。仿真研究表明,工作于434MHz时,天线贴片尺寸可下降到原来工作波长的1/30。通过调整,也可以使天线在2.45GHz附近谐振,从而实现双频工作。该小型化天线在RFID频段具有较大的实用价值。

关键词 螺旋谐振环 负磁导率 Meta材料 小型化 双频天线 RFID

Miniaturization of Micro-strip Antenna Based on Spiral Resonators

LIU Haiyan, XIONG Wei, LIAO Bin

(Department of Electronic Engineering, College of Information Science Technology, East China Normal University, Shanghai 200241)

Abstract A new method of micro-strip antenna miniaturization is presented in this paper. The μ -negative Meta-materials is realized by filling substrate with spiral resonators (SR), which can miniaturize the low frequency antenna. Numerical simulation shows that the size of the antenna is reduced to one-30th of its operating wavelength at 434MHz. And the antenna can also operate around 2.45GHz by adjusting the size of patch. The novel antenna can be applied to RFID band for its practical values.

Key words SR, negative Meta materials, miniaturization, double-frequency antenna, RFID

近年来,随着现代通信技术的不断发展,对微波器件的小型化也提出了越来越高的要求。天线是无线通信系统中非常重要的组成部分,在传统天线设计中,天线的工作频段总会受到物理尺寸的限制,若需要在较低频段的天线工作,则必须保证其结构尺寸足够大。然而对于一些无线设备尤其是手持式终端中,用于放置天线的空间是非常有限的,而且放置空间有越来越小的趋势。

与普通的微波天线相比,微带天线实现了一维小型化,具有底轮廓、可共形、易集成,以及便于获得圆极化,实现双频、双极化工作等多项优点,所以研究微带天线小型化就显得非常必要^[1]。

目前提出的减小微带天线尺寸的理论和方法大致可分为2类:一类是改变天线贴片的几何形状和结构,如在介质中加入短路探针、在贴片上开槽、加载电容或电阻或是采用蝶形贴片等;另一类是采用高介电常数的介质或磁性材料^[2]。本研究采用人工磁性材料设计了一种圆形贴片天线,这种天线能大范围地减小天线贴片尺寸,而且理论上可以做到任意低频^[3]。

1 理论基础

图1为加载电磁超介质的圆形贴片天线。介质基板的厚度为 h ,在半径为 a 的贴片下方存在由2部分组成的不均匀衬底:外圈材料的介电常数和磁导率为分别 ϵ_1 、 μ_1 ,内核材料的介电常数和磁导率分别为 ϵ_2 、 μ_2 。 η 代表贴片正下方2

种材料的填充比($0 < \eta < 1$),内核材料的半径为 ηa 。采用谐振腔模型分析,将贴片边界下的区域等效成一个圆柱形的磁壁。在满足边界条件的情况下,对于 TM_{mn} 模式可以得到下列色散关系:

$$\mu_2 \frac{J_n(k_2 \eta \mu)}{J_n'(k_2 \eta \mu)} = \mu_1 \frac{J_n(k_1 \eta \mu) Y_n'(k_1 a) - Y_n(k_1 a) J_n'(k_1 a)}{J_n'(k_1 \eta \mu) Y_n'(k_1 a) - Y_n(k_1 a) J_n'(k_1 a)} \quad (1)$$

式中: $J_n(x)$ 是贝塞尔函数, $Y_n(x)$ 是纽曼圆柱贝塞尔函数。 n 是模式的角变换的阶数($e^{-im\varphi}$, φ 是圆柱坐标系中的角度)。当满足 $a \leq \min[2\pi/k_1, 2\pi/k_2]$ 时,式(1)可以简化成:

$$\frac{\eta^2}{1 - \eta^2} \approx -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad n = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1 - \eta^{2n}}{1 + \eta^{2n}} \approx -\frac{\mu_1}{\mu_2} \quad n > 0 \quad (3)$$

从式(2)和式(3)可以看到,等式左边恒为正,若想使等式成立则右边也必须为正,才能激励出 n 所对应模式的频率。换句话说,如果采用2种参数符号相反的介质,就能激励出 n 所对应模式的频率,即选择介电常数相反的2种材料和一定的 η ,能够激励出 $n=0$ 的模式;也可以通过选择符号相反的 μ_1 、 μ_2 以及一定的 η 来决定 $n > 0$ 时的值。在采用常规DPS材料的圆形贴片中起主要作用的是 $TM_{1,0}$ 模式^[5]。根据前面的分析,在常规DPS材料中加载这种介电常数或磁导率符号相反的介质材料,就可以为主模选择所需的角变换 n ,从而决定其谐振频率。

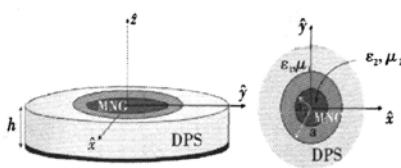


图1 加载电磁超介质的圆形贴片天线

Fig. 1 Circular antenna loaded with electromagnetic meta-materials

2 数值仿真

使用基于有限积分法的 CST Microwave Studio 软件,从理想设置负磁导率材料和实际应用 SR 结构实现负磁导率材料,并将其加载到常规 DPS 材料的圆形天线中进行仿真分析、比较。

2.1 加载理想负磁导率材料的圆形贴片天线的仿真

加载理想负磁导率材料的圆形贴片天线的结构如图 2 所示。贴片半径为 a , 底衬厚度为 h , 外圈材料的介电常数和磁导率为 ϵ_2 和 μ_2 , 内核材料半径为 a_1 , 介电常数和磁导率分别为 ϵ_1 和 μ_1 。

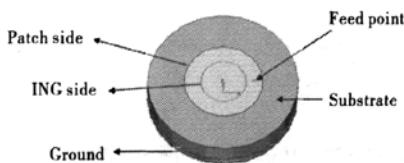


图2 加载理想负磁导率材料的天线模型

Fig. 2 Antenna model loaded with ideal μ -negative meta-materials

令 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.55\epsilon_0$, $\mu_1 = \mu_0$, $a = 34.5\text{mm}$, $h = 7\text{mm}$, 若取 $\mu_2 = -2\mu_0$, $n = 1$, 可得:

$$\frac{1 - \eta^{2n}}{1 + \eta^{2n}} \approx -\frac{\mu_0}{-2\mu_0} = \frac{1}{2} \quad (4)$$

所以:

$$\eta = \frac{a_1}{a} = \frac{\sqrt{3}}{3} \quad (5)$$

经计算, 得到 $a_1 = 20\text{mm}$ 。

假设天线内核介质的磁导率符合 Lorentz 色散特性, 其磁导率满足:

$$\mu = \mu_0 + \frac{(\mu_s - \mu_0)\omega_0^2}{\omega_0^2 - j\omega\delta - \omega^2} \quad (6)$$

令 $\mu_s = 2\mu_0$, $\delta = 0.01\text{GHz}$, $\omega_0 = 2\pi \times 0.36 \times 10^9 \text{rad/s}$, 得到的曲线如图 3 所示。当 $\omega_0 < \omega < \omega_{mp}$ 时, μ_1 的实部为负值。当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, μ 的实部值接近于 1, 可近似看成普通的 DPS 材料。而当频率小于 ω_0 时, μ 的实部值为正, 并有谐振峰。

把这种磁导率符合 Lorentz 色散特性的介质加载到前面所提到的圆形贴片天线的介质层的内核区, 选取其磁导率为负的特定频点就可以实现如图 2 所示的天线模型。

此外, 图 2 中天线的辐射特性直接与 $\rho = a$ 处的等效磁流

有关, 而等效磁流由边缘电场决定, 即 $\vec{K} = -\hat{\rho} \times \vec{E}|_{\rho=a}$ 。在球坐标系 (θ, φ) 中, 辐射功率为:

$$P_{rad} \propto \int_0^{2\pi} e^{-j\omega t'} \sin[n(\varphi - \varphi')] e^{jk_a \sin\theta \cos(\varphi - \varphi')} d\varphi' \quad (7)$$

在准静态条件下, 即 $k_a a \ll 1$ 时, 式(7)可简化为:

$$P_{rad} \propto \int_0^{2\pi} e^{-j\omega t} \sin[n(\varphi - \varphi')] d\varphi' = j\pi e^{-j\omega t} (n-1) \quad (8)$$

式中: $\delta(x)$ 在 $x=0$ 时为 1, 在 $x \neq 0$ 时为 0, 表明 TM_{110} 模式可以产生辐射且与贴片的半径尺寸无关^[4]。

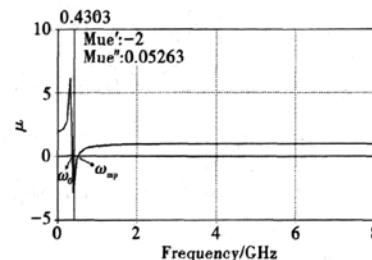
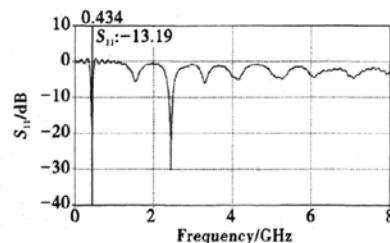
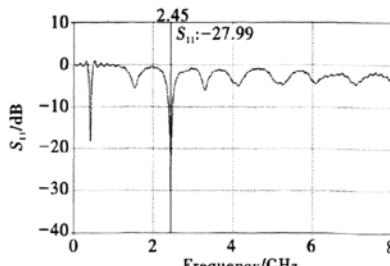


图3 符合 Lorentz 色散特性的磁导率曲线

Fig. 3 μ curves characterized with Lorentz dispersion

图 3 仿真结果显示, 在 430.3MHz 时, $\mu_2 = -2$, 因此可以预测, 在这个频率附近会出现所要的低频点, 而贴片本身的尺寸也能够决定一个频点。对图 2 所示天线模型进行仿真, 得到天线的 S_{11} 参数如图 4、图 5 所示, 2 个频点分别为 434MHz 和 2.45GHz, S_{11} 分别为 -13.19dB 和 -27.99dB , 带宽分别为 0.8% 和 1.6%, 与理论预测较吻合。

图4 434MHz 时天线的 S_{11} 参数Fig. 4 S_{11} curve at 434MHz图5 2.45GHz 时天线的 S_{11} 参数Fig. 5 S_{11} curve at 2.45GHz

2.2 加载实际 SR 结构后圆形贴片天线的仿真

本研究设计的天线模型如图 6 所示。

该天线设置在相对介电常数为 2.55、厚度为 7mm 的 FR4 介质基板上,谐振单元的参数为:最外围谐振环边长 $L=6.1\text{mm}$,宽度 $W=0.1\text{mm}$;相邻两谐振环间的带隙宽 $S=0.1\text{mm}$,环数 $N=5$ 。天线最终参数如下:介质半径 $R=50\text{mm}$,贴片半径 $a=34.5\text{mm}$,加载螺旋谐振环单元部分的介质半径 $a_1=21\text{mm}$,馈电置于距圆点 22.2mm 处。使用电磁仿真软件 CST 对上述结构进行仿真分析及优化设计,得到加载螺旋谐振单元后天线的 S_{11} 参数,如图 7 和图 8 所示。

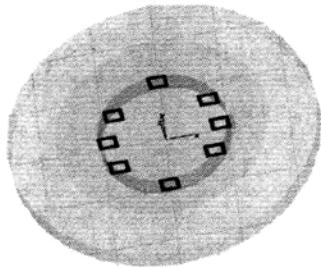


图 6 螺旋谐振单元(SR)加载后天线的结构图

Fig. 6 Antenna structure loaded with spiral resonator unit

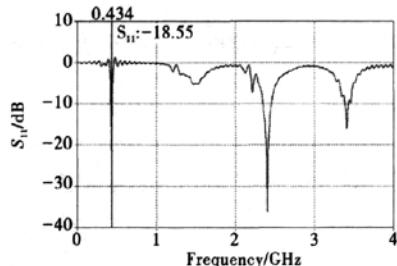


图 7 加载螺旋谐振单元后 434MHz 时的 S_{11} 参数

Fig. 7 S_{11} curve of antenna loaded with spiral resonator unit at 434MHz

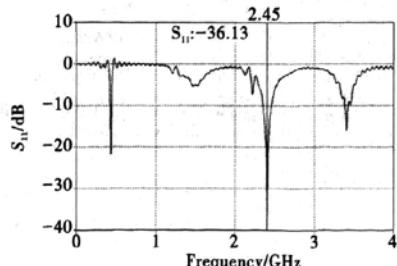


图 8 加载螺旋谐振单元后 2.45GHz 时的 S_{11} 参数

Fig. 8 S_{11} curve of antenna loaded with spiral resonator unit at 2.45GHz

由图 7、图 8 可知,加载实际螺旋谐振单元后,天线的 S_{11} 参数曲线与前面加载理想负磁导率材料后天线的 S_{11} 参数曲线基本吻合。可见通过加载螺旋谐振单元(SR)实现了预期设想的负磁导率材料,而且当天线工作在 434MHz 和 2.45

GHz 时,贴片尺寸仅为自由空间波长的 0.05 和 0.23, S_{11} 分别为 -18.55dB 和 -36.13dB 。图 9、图 10 分别为加载螺旋谐振单元 434MHz 和 2.45GHz 时的方向图。由图 9、图 10 可知,天线极化特性良好,434MHz 时 E 面方向图最大方向性为 3.1dBi ,2.45GHz 时为 3.4dBi ;增益分别为 -23.9dB 和 3.3dB 。可见,在低频段天线尺寸大幅减小,实现了天线的小型化,但是天线增益较小;在高频段天线尺寸改变幅度较小,但增益比低频段大,因此今后的工作是继续改进低频段增益及方向性,使之能够满足应用要求。

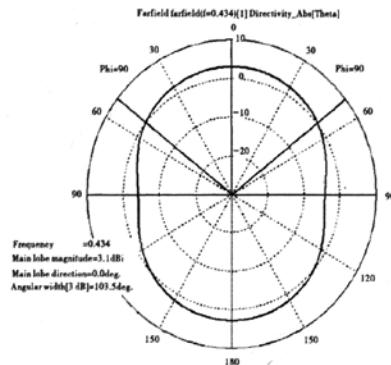


图 9 加载螺旋谐振单元 434MHz 时的方向图

Fig. 9 Radiation pattern of antenna loaded with spiral resonator unit at 434MHz

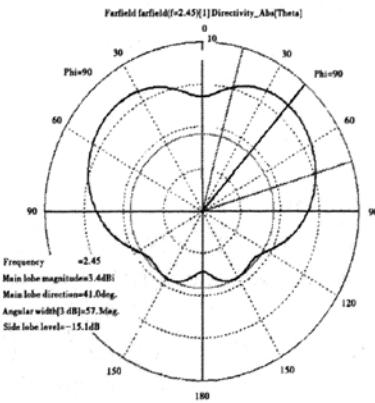


图 10 加载螺旋谐振单元 2.45GHz 时的方向图

Fig. 10 Radiation pattern of antenna loaded with spiral resonator unit at 2.45GHz

3 结论

研究了一种微带天线小型化的新方法,并采用该方法设计了一种天线,通过仿真对尺寸进行优化,给出了天线的结构参数。仿真研究表明,该天线的反射特性与理论结果基本吻合,初步验证了通过加载螺旋谐振单元可以实现天线小型化的可行性。该天线在 2 个频段(434MHz 和 2.45GHz)工作,因此在 RFID 领域有一定的应用价值。

(下转第 166 页)

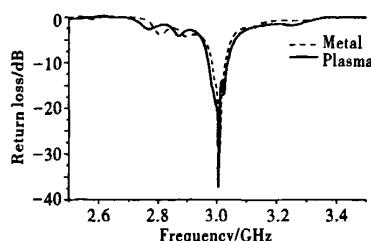


图 6 3×5 元半导体等离子体串馈平面阵及其相应金属天线的 S11 曲线

Fig. 6 The return loss of the semiconductor-plasma planar array compared with the equivalent metal antenna

4 结论

本研究提出了一种可重构半导体等离子体阵列天线,采用不同的激励方案,设计了 3 个辐射方向分别为 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=18^\circ$ 和 $\theta=26^\circ$ 的 5 元半导体等离子体串馈线阵,增益分别为 11.48dBi、11.42dBi 和 10.93dBi,结果表明天线阵可以灵活实现方向图赋形,具有可重构性;设计了工作频率为 3GHz 的 3×5 元半导体等离子体端射平面阵,增益为 15.86dBi。此种天线阵通过电调的方法实现不同的预置激励方案,可形成可控的不同分布的被激发等离子体辐射单元阵列,可以灵活控制其方向图,容易实现波束扫描和赋形功能;其介质板和半导体薄膜材料作基板可采用柔性材料,更易实现共形;

(上接第 157 页)

参考文献

- 薛睿峰,钟顺时.微带天线小型化技术[J].电子科技,2002,(3):62
- 顾伟,张需溥,钟顺时.以有机磁性材料为基片的小型化、宽频带矩形微带天线[J].上海大学学报:自然科学版,2002,8(1):25
- Filiberto Bilotti, et al. Design of miniaturized metamaterial patch antennas with negative loading[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2008, 56(6):1640
- 王安国,等.可重构天线的研究现状与发展趋势[J].电波科学学报,2008,23(5):997
- 王大涵.天线隐身技术浅析[J].飞航导弹,1991,1:23
- Norris, et al. Reconfigurable plasma antenna: US, 6369763 [P]. 2002-04-09
- Anderson, et al. Multiple tube plasma antenna: US, 5963169 [P]. 1999-10-05
- 刘志勇.等离子体天线研究与发展概况[J].计算机与网络,2008,23:49
- 陆全康.固态等离子体物理[J].自然杂志,1986,9(3):183
- Jonscher A K. Solid state plasma phenomena[J]. Brit J Appl Phys, 1964, 15:365
- Tulintseff A N. Series-fed-type linear array of dipole and slot elements transversely coupled to a microstrip line[J]. Antennas Propagation Soc Int Symp, 1993, 1:128
- Nirod K D, David M P. Analysis and design of series-fed arrays of printed-dipoles proximity-coupled to a perpendicular microstripline[J]. Trans Antennas Propagation, 1989, 37(4):435
- Andrea Alù, Filiberto Bilotti, Nader Engheta, et al. Subwavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2007, 55(1):13
- Pozar D M, Schaubert D H. Microstrip antennas: The analysis and design of microstrip antennas and arrays[M]. New York: IEEE Press, 1995
- Filiberto Bilotti, Alessandro Toscano, Lucio Vigni. Design of spiral and multiple split-ring resonators for the realization of miniaturized metamaterial samples[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(8):2257

由于等离子体的隐身特性,在辐射单元未被激发时天线不具有辐射特性,更易避开敌方雷达的侦查,适合于军事方面应用。

参考文献

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>