

基于粒子群算法的环形天线的优化设计

李文涛 缪志华 蒋守明 史小卫

(西安电子科技大学天线与微波技术重点实验室 西安 710071)

liwentao_xa@163.com

摘要: 本文研究了一种新的基于复合左右手传输线天线,通过移除不必要的串联电容,不仅可以减小天线的体积而且可以降低天线结构的复杂性。进一步,本文将粒子群算法(PSO)和 HFSS 软件相结合对该天线进行优化设计,并制作具有不同单元数目的天线。结果显示了所设计天线无限波长谐振特性,但与传统天线相比,该天线具有与物理尺寸无关,低交叉极化,全向辐射等特性。实验结果表明 PSO/HFSS 方法是天线优化设计中的一种有效的方法。

关键词: 粒子群优化算法,复合左右手传输线,微带环形天线,无限波长

Optimal Design of Ring antenna Based on Particle Swarm Optimization

LI Wen-tao MIAO Zhi-hua JIANG Shou-ming SHI Xiao-wei

(National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel infinite wavelength microstrip ring antenna supported by the composite right/left-handed (CRLH) metamaterial transmission line is presented. By taking away the nonessential series capacitance, both the size and the structure complexity of the antenna have been reduced. Furthermore, linked with HFSS, PSO is used to design an infinite wavelength microstrip ring antenna. Antennas with different number of unit-cells are designed and fabricated to demonstrate the features of the infinite wavelength resonance. Compared with the traditional antenna, the proposed antenna has the advantages of undependable of physical size, low cross polarization and omni-directional radiation. The experimental results show that the PSO/HFSS method is an effective method in the antenna design.

Keywords: Particle swarm optimization (PSO); Composite right/left-handed transmission line (CRLH TL); Microstrip ring antenna; Infinite wavelength

1 引言

近年来,左手媒质(metamaterials),即等效介电常数和等效磁导率同时为负的人工媒质,因其新颖的特性而在科学和工程领域引起了广泛的关注^[1, 2]。随着对传输线模型实现左手媒质的理论和应用深入研究,人们发现右手分量也会对器件的性能有所贡献。2004年Itoh等人提出了具有左手媒质特性的新型人工传输线——混合左右手(CRLH)结构^[3],在此基础上,实现了许多新型微波器件,如滤波器、移项器、混频器、天线等^[4-5]。

在对微波器件和天线的设计中,为了达到所要求的指标或获得最优的器件性能,许多结构参数需要调整,通常都是设计人员通过手动调整来完成这一任务。为了加快设计效率并提高元器件的性能,

需要发展一种有效且更为普遍的优化方法。近年来基于进化的各种智能算法,如遗传算法和粒子群算法得到了很快的发展,并有效地应用于电磁场领域^[6]。PSO算法是由Kennedy和Eberhart于1995年提出的一种基于群体智能的演化算法^[7]。由于PSO在函数优化、组合优化等领域所蕴含的广阔应用前景,许多研究者在这方面进行了大量的研究。目前,PSO已广泛应用于数据处理、图象处理、系统控制等领域。

本文将PSO算法和HFSS软件结合设计基于CRLH的微带天线,该天线具有无限波长特性,且与传统天线相比,具有结构紧凑、低交叉极化,全向辐射等特性。由于HFSS软件可以提供比近似解析解更加精确的目标函数计算值,本文将HFSS软件与PSO算法相结合对天线进行优化设计,以获得期望

的天线性能。

2 无限波长环形天线的设计

2.1 天线结构

复合左右手传输线的单元等效电路模型如图1(a)所示。通过对单元应用周期边界条件(Bloch-Floquet定理)，可以得到该单元电路的色散关系

$$\beta(w)p = \cos^{-1} \left(1 + \frac{Z(w) \cdot Y(w)}{2} \right) \quad (1)$$

其中串联阻抗和并联导纳分别为

$$Z(w) = j \left(wL_R - \frac{1}{wC_L} \right) \quad (2)$$

$$Y(w) = j \left(wC_R - \frac{1}{wL_L} \right) \quad (3)$$

图1(b)给出该单元的色散图。通过将单元周期长度为 p 的 N 个单元级联，就得到了总长为 $L=N \cdot p$ 的复合左右手传输线。在谐振条件下，复合左右手传输线可以用作谐振器

$$\beta_n = \frac{n\pi}{L} \quad (4)$$

其中 n 是谐振模数，可以是正数、负数甚至是零^[8]。当 $n=0$ 时，该CRLH TL就支持独立于其长度的无限波长模式。

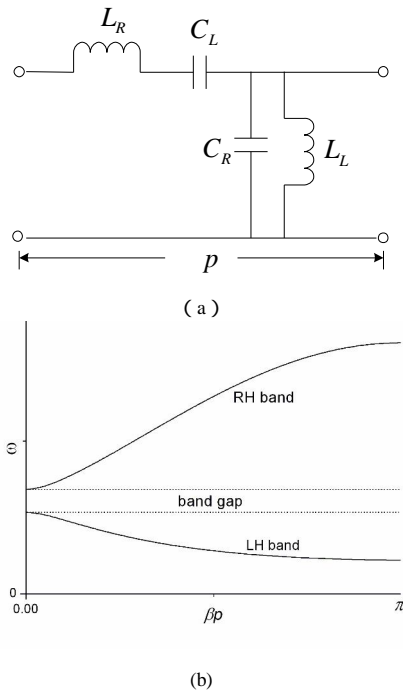


图1 (a) 传统 CRLH 单元等效电路 (b) 色散曲线

本文考虑的是去掉串联电容的简单复合左右手传输线，等效电路图如图2(a)所示，单元相移^[8]:

$$\beta(w)p = \cos^{-1} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{L_R}{L_L} - w^2 L_R C_R \right) \right) \quad (5)$$

相应的色散曲线如图2(b)所示。

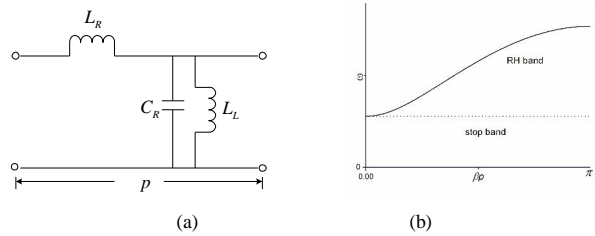


图2 (a) 简单CRLH单元等效电路 (b) 色散曲线

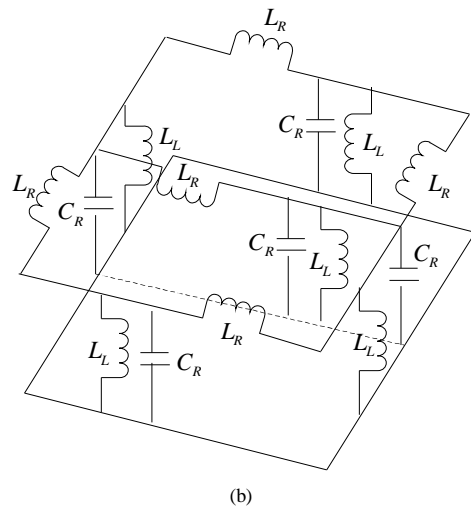
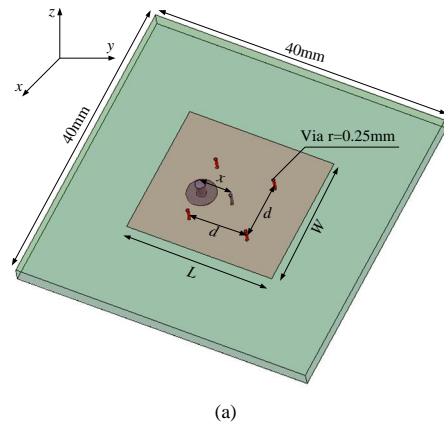


图3 (a) 环形天线结构图 (b) 等效电路

比较这两种结构的色散关系可以发现，所提简单的复合左右手传输线仍然具有零阶谐振的特性，并且谐振频率仅由并联谐振频率决定

$$w_{sh} = \frac{1}{\sqrt{C_R L_L}} \quad (6)$$

当天线工作于 $n=0$ 的模式时，波长为无限长，天线的物理尺寸可以任意，这个特性具有十分重要的实际意义在于它可以实现电大或电小天线。

Mushroom结构是实现CRLH TL的常用结构，与常规mushroom结构不同，本文在其四周在加4个过孔，形成一个方形环，而对于有限单元该结构也可以满足无限周期边界条件。天线的结构图和等效电路图分别如图3(a), (b)所示。其中单元的长 L ，宽 W ，馈电的位置 x ，过孔之间的距离 d 由PSO算法结合HFSS软件优化得到。

2.2 PSO算法

在PSO算法中，每个优化问题的解看作是搜索空间中的一个粒子，它有自己的位置和速度，粒子位置坐标对应的目标函数值为该粒子的适应度。在每次迭代中，各粒子记忆、追随当前的最优粒子，通过跟踪两个“极值”位置来不断更新自己：一个是粒子本身所找到的最优解位置，即个体极值位置 \vec{p}_i ，另一个是整个种群目前找到的最优解位置 \vec{p}_g ，粒子按式(7)和式(8)更新其速度和位置：

$$\vec{v}_i(\tau+1) = w\vec{v}_i(\tau) + c_1 r_1 (\vec{p}_i(\tau) - \vec{x}_i(\tau)) + c_2 r_2 (\vec{p}_g(\tau) - \vec{x}_i(\tau)) \quad (7)$$

$$\vec{x}_i(\tau+1) = \vec{x}_i(\tau) + \vec{v}_i(\tau+1) \quad (8)$$

其中， \vec{v}_i 是粒子的速度矢量， \vec{x}_i 是粒子的位置矢量。 c_1 、 c_2 是学习因子， r_1 、 r_2 是[0-1]之间均匀分布的随机数， w 是惯性权重因子，由式(9)确定。

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T} \tau \quad (9)$$

其中 $w_{\max} = 0.9$ ， $w_{\min} = 0.4$ 。

如果当前对粒子的加速导致它在某维的速度超过 V_{\max} ，则该维的速度被限制为该最大速度。进一步，速度更新公式(7)可以分解为三部分，其中第一部分为粒子原有速度分量；第二部分为“认知”分量，表示粒子个体自身的思考过程；第三部分为“群体”分量，表示粒子群体间的信息共享和相互合作过程。

3 仿真实验结果

天线的介质基板厚度为2mm，介电常数为4.4，

由PSO算法结合HFSS优化得到的结构尺寸示于表1。为了验证天线的无限波长特性，本文仿真并制作了具有1个单元、2个单元、3个单元的天线。

表1 优化所得的结构尺寸(单位：mm)

W	L	x	d
20	19.4	4.2	8.8

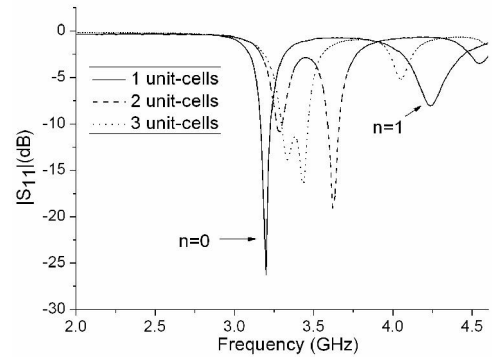
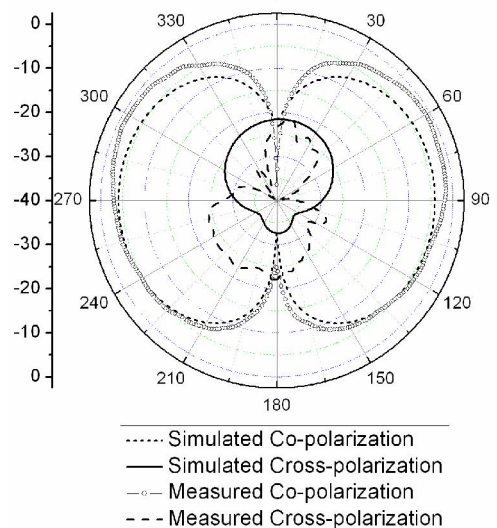


图4 实测S参数

实测的回波损耗如图4所示，可以看出这三个天线的谐振频率分别为3.20GHz，3.32GHz，3.40GHz。尽管尺寸增加了200%，而频率仅偏移了6.2%。仿真和实测单元方向图如图5所示，2单元和3单元的方向图未给出的原因是其与单个单元的方向图类似。可以看出这种天线具有类似单极子天线的方向图特性，在x-y面具有全向辐射特性。从以上结果分析可知，随着尺寸的增大，无限波长所在的谐振频率点近似不变。此外，与传统的半波长天线相比，这种天线的尺寸可以减小大约53.3%。



(a)

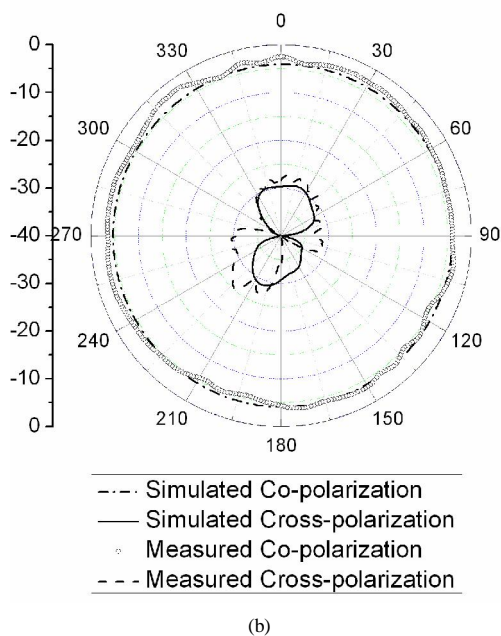


图5 单元天线的仿真实测辐射方向图。(a) $\Phi=0^\circ$ 方向图(x-z plane) (b) $\Theta=90^\circ$ 方向图(x-y plane)

5 结论

本文将粒子群算法与HFSS软件相结合对基于简单复合左右手传输线的微带天线进行优化设计。由于去除了不必要的串联电容，减小天线体积的同时降低了天线的复杂性。此外，在传统的mushroom结构四周增加了四个过孔，使得有限单元数目的结构也可以满足无限周期边界条件。与传统天线相比，所设计的无限波长天线与物理尺寸无关，并且具有低交叉极化，全向辐射特性。实验结果表明了PSO/HFSS方法是天线优化设计中的一种有效的方法。

参考文献

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu," *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, pp. 504-514, 1968.
- [2] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 3966-3969, 2000.
- [3] A. Sanada, C. Caloz, T. Itoh, "Planar distributed structures with negative refractive properties," *IEEE Trans. Microwave Theory Technology*, vol. 52, pp. 1252-1263, 2004.
- [4] S. G. Mao, Y. Z. Chueh, M. S. Wu, "Asymmetric dual-passband coplanar waveguide filters using periodic composite right/left-handed and quarter-wavelength stubs," *IEEE Microwave Component Letters*, Vol. 17, pp. 418-420, 2007.
- [5] A. Lai, K. M. K. H. Leong T. Itoh, "A novel N-port series divider using infinite wavelength phenomena," In the *IEEE MTT-S international symposium digest*, Long Beach, CA, 1001-1004, 2005.
- [6] S. Selleri, M. Mussetta, P. Pirinoli, et al, "Differentiated meta-pso methods for array optimization," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 56, pp. 67-75, 2008.
- [7] F. J. Villegas, "Parallel genetic-algorithm optimization of shaped beam coverage areas using planar 2-d phased arrays," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 55, pp. 1745-1753, 2007.
- [8] A. Lai, K. M. K. H. Leong T. Itoh, "Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 55, pp. 868-876, 2007.

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,一直致力和专注于微波、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>