

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23120131153123

UDC_____

厦 门 大 学

硕士学位论文

基于不规则/非对称结构的左手材料单元及其天线设计

**Design of Left-handed Material Units and Their Antennas
Based on Irregular/Asymmetric Structures**

李 坚

指导教师姓名: 周建华 教 授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

左手材料表现出很多奇特的电磁特性，使其在电磁学、微波和天线工程以及材料学等诸多领域拥有广阔的应用前景。目前，工作于微波频段的左手材料单元结构变化有很大一部分来源于经典的开口谐振环加金属线结构 (SRR+Rod)，主要以规则、对称构型，一般双负频带窄、损耗大、尺寸也偏大，难以应用于有特殊性能要求和空间限制的微波器件。

本文针对目前微波频段左手材料所存在的以上缺点，提出了不规则及非对称两个系列的左手材料单元结构，即 DNA 形仿生结构和 R 形结构。在 DNA 形仿生系列中，首先讨论了双螺旋左手结构单元，该结构以较小的尺寸在 10 GHz 左右形成了较宽的双负特性频带，并且损耗很低。接着在此双螺旋左手结构中引入交指电容来控制左手材料的谐振频点及左手特性带宽，通过对交指电容指尖的锥状变形以及在交指电容指臂上开孔，使 DNA 形双螺旋左手结构获得更多的调节参数。然后以此为基础构成二阶 DNA 双链左手结构，使其谐振频点降低 37%。最后针对二阶余弦 DNA 双链左手结构，分析了余弦金属线幅度、周期、粗细等几何参数对左手材料电磁特性的影响。

在 R 形左手材料系列中，首先讨论了简单 R 形左手结构单元，其以简洁的结构设计实现了在 7.3 GHz 附近的双负特性。但是由于其结构的非对称性，使其电谐振频点与磁谐振频点相差很大：电谐振频点在 6.00 GHz，磁谐振的频点在 7.50 GHz，导致其双负特性带宽变窄。然后在 R 形左手结构上做嵌套环变形设计出一款多频左手材料。该左手材料在 7.7 GHz，10.0 GHz，12.9 GHz 附近等多个频段均表现出明显的左手特性，为多频左手材料的设计提供了新的思路。

此外，本文还利用一款环形 R 负磁导率结构设计出工作频点可在 5.19 GHz (WLAN 中频) 单频以及 3.33 GHz (WiMAX 中频)、5.41 GHz (WiMAX 高频) 双频间任意切换的可重构单极子天线，并将规则 DNA 双链左手结构以缝隙加载的形式刻蚀在单极子天线中，设计出工作于 WLAN/WiMAX 频段的双频单极子天线。最后，将嵌套 R 形左手结构以缝隙形式加载于单极子天线中实现 WLAN/WiMAX 三频天线。

关键词：左手材料；不规则结构；非对称结构；电磁特性；单极子天线

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Left handed materials show a lot of unusual electromagnetic characteristics, which makes them have broad application prospects in many fields, such as electromagnetism, microwave and antenna engineering, material science and so on. At present, most structural deformations of left-handed material units working in microwave frequency bands derived from the classical open resonant ring and metal wire structure(SRR+Rod). These structures are generally regular and symmetrical, with narrow double negative frequency bands, high loss, large sizes, so it is difficult to apply them to the microwave device.

In this paper, two series of irregular and asymmetric left handed material units are proposed for the operation of microwave frequency bands: DNA-shaped biomimetic left handed materials and R-shaped left handed materials. For the former, we first designed a DNA double helix left-handed structure unit, which could form a wide dual negative characteristics frequency band at 10 GHz with smaller size and very low loss. Then, an interdigital capacitance is introduced into the DNA double helix to control the resonant frequency and the bandwidth of the designed left handed material. In order to further improve the electromagnetic properties, more adjustment parameters are obtained through interdigital cone deformation and cutting holes on the interdigital finger arms. A two-order DNA double stranded left-handed structure is designed based on the DNA double helix, that can make the resonance frequency point decreased 37%. Finally, the effects of the geometric parameters of the two - order cosine DNA double chain left handed structure such as amplitude, period and thickness on the electromagnetic properties are analyzed.

First, a simple R-shaped left-handed unit is discussed, which forms double negative characteristics near 7.3 GHz by a simple structure. But due to the asymmetry of the structure, there is a large different between electric resonance frequency and magnetic resonance frequency: electric resonance frequency at 6.00 GHz, magnetic resonance frequency at 7.50 GHz, which lead its bandwidth of double negative

characteristic turn narrow. Then design a multi band left-handed material by variation of embedded rings. This left handed material forms a significant left handed characteristic in 7.7 GHz, 10 GHz, 12.9 GHz, It provides a new way for the design of multi frequency left handed materials.

Applying the proposed R-shaped left handed units, this article designs a reconfigurable monopole antenna which can operates in two modes: single-band at 5.19 GHz or dual-band at 3.33 GHz and 5.41 GHz. Finally, the nested R shaped left-handed material is loaded on the bottom of the WLAN/WiMAX dual band monopole antenna medium substrate to improve the radiation property. The three designed monopole antennas can be used in WLAN/WiMAX wireless communication systems.

Key Words: Left handed materials; Irregular structure; Asymmetric structure; Electromagnetic characteristics; Monopole antenna

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
Contents	VIII
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 左手材料研究进展.....	2
1.2.2 左手材料在天线应用的研究进展.....	7
1.3 本论文内容安排.....	9
1.4 本论文创新点.....	11
参考文献.....	12
第二章 左手材料理论模型及分析方法	17
2.1 引言.....	17
2.2 等离子体理论.....	17
2.2.1 负介电常数实现原理.....	17
2.2.2 负磁导率实现原理.....	19
2.3 等效传输线理论.....	21
2.4 等效电磁参数提取方法	22
2.5 单极子天线基本原理.....	26
2.6 本章小结.....	28
参考文献.....	28

第三章 DNA 形仿生左手材料单元结构设计与分析	30
3.1 引言	30
3.2 DNA 双螺旋左手材料分析	30
3.2.1 单元模型设计	30
3.2.2 数值仿真分析	31
3.2.3 等效电路模型分析	34
3.2.4 参数扫描分析	36
3.3 DNA 双螺旋交指左手材料	38
3.3.1 普通交指结构	39
3.3.2 锥状交指结构	44
3.3.3 指臂开孔结构	48
3.4 二阶 DNA 双链左手材料	51
3.4.1 规则 DNA 双链左手结构	52
3.4.2 不规则 DNA 双链左手结构	56
3.5 本章小结	60
参考文献	61
第四章 基于 R 形左手材料的单元结构设计与分析	62
4.1 引言	62
4.2 R 形非对称左手结构	62
4.2.1 R 形左手结构	62
4.2.2 嵌套 R 形左手结构	65
4.3 本章小结	70
参考文献	71
第五章 左手材料在微带天线中的应用	72
5.1 引言	72
5.2 加载环形 R 负磁导率结构的 WiMAX/WLAN 单极子天线 ..	72
5.3 加载 DNA 形左手结构缝隙的多频天线	79
5.4 加载嵌套 R 形左手结构缝隙的三频天线	84

5.5 本章小结.....	89
参考文献.....	89
第六章 总结与展望	91
5.1 总结.....	91
5.2 展望.....	92
附录 1 攻读学位期间的研究成果	94
致谢.....	95

厦门大学博硕士论文摘要库

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Significance of LHMs	1
1.2 Current Research of LHMs	2
1.2.1 Development of LHMs	2
1.2.2 Applications of LHMs in Antenna Design.....	7
1.3 Brief Summary	9
1.4 Main Points of The Dissertation	11
References	11
Chapter 2 Basic Theory And Analysis Method of LHMs	17
2.1 Introduction	17
2.2 Plasma Theory of LHMs	17
2.2.1 The Principle of Negative Permittivity	17
2.2.2 The Principle of Negative Permeability.....	19
2.3 Transmission Line Theory	21
2.4 Extraction Algorithm of Equivalent EM Parameters	22
2.5 Multi-frequency Antenna Design Principle	26
2.6 Brief Summary	28
References	28
Chapter 3 Design and Analysis of DNA shaped LHMs	30
3.1 Introduction	30
3.2 Analysis of DNA Unit LHMs	30

3.2.1 Model Design.....	30
3.2.2 Numerical Analysis	32
3.2.3 Equivalent Circuit Model Analysis	34
3.2.4 Parameter Sweep.....	36
3.3 DNA Unit LHMs Loaded with Interdigital Capacitor	38
3.3.1 Normal Interdigital Capacitor	39
3.3.2 Dip Shaped Interdigital Capacitor	44
3.3.3 Interdigital Capacitor with Circular Cut	48
3.4 DNA Shaped LHMs	52
3.4.1 Circular DNA Shaped LHMs.....	52
3.4.2 Irregular DNA Shaped LHMs.....	56
3.5 Brief Summary	60
References.....	61
Chapter 4 Design and Analysis of R-Shaped LHMs	62
4.1 Introduction	63
4.2 Asymmetric LHMs	62
4.2.1 R-Shaped LHMs	62
4.2.2 Nested R-Shaped LHMs	65
4.3 Brief Summary	71
References.....	71
Chapter 5 Application of LHMs for Microstrip Antennas	72
5.1 Introduction	72
5.2 WiMAX/WLAN Monopole Antenna Loaded with Metamaterials	72
5.3 Multi-Frequency Antenna Loaded with DNA-Shaped LHM Aperture	79
5.4 Monopole Antenna Loaded with R-Shaped LHM in Substrate	84

5.5 Brief Summary	89
References	89
Chapter 6 Conclusion and Expectation	91
6.1 Conclusion	91
6.2 Expectation	92
Appendix 1 Research Results During The Period of Studying For Master's Degree	94
Acknowledgements	95

厦门大学博硕士学位论文摘要

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

电磁超材料 (Metamaterials) 是一种具有自然界不存在特性的人工复合材料^[1]。它由多个复合材料如金属、塑料等的单元组装而成。这些材料单元往往是周期重复排列, 并且它们的尺寸小于对应的波长。超材料的特性并非来自它们的基础材料, 而是来自它们的新型结构。它们的形状、结构、大小、方向以及排列使其具有控制电磁波的特性, 通过阻塞、吸收、加强、弯曲电磁波来获得远超普通材料的电磁特性^[2-3]。

作为超材料的一种, 左手材料 (Left-handed Materials) 也称作负折射率材料 (Negative Index Metamaterials), 反向波媒质 (Backward Wave Media), 双负超材料 (Double Negative Metamaterials) 在电磁波的某些频段显示出负的折射率^[4]。左手材料由远小于波长的单元组成, 这些单元或堆叠, 或成曲面并以特殊的重复模式组成了独特的材料。对该材料的设想最早由 V.G.Veselago 提出^[5], 他假设存在一种材料, 其电场、磁场和波矢量满足左手螺旋定则, 其介电常数 ϵ 及磁导率 μ 均为负。而且在左手材料中传播的电磁波的波矢量 \vec{k} 和坡印廷矢量 \vec{S} 刚好相反, 因此左手材料相比自然界的普通材料拥有许多奇异的电磁特性。

由于左手材料的这些奇异电磁特性如: 逆多普勒效应、倏逝波放大效应、逆切伦科夫辐射效应 (Cerenkov)、后向波效应、“完美透镜”效应以及负折射率等, 它能用于实现电磁波吸收器如雷达微波吸收器, 电小尺寸谐振器, 超越衍射极限的波导, 相位补偿器, 还有一些聚焦设备如微波透镜, 以及性能优良的电小尺寸天线^[6-9]。左手材料还有一些潜在用途如纳米光刻, 纳米电路, 还有可用于生物医学成像及亚波长光刻的近场超级透镜。

作为左手材料的重要应用方向之一, 超材料天线正在吸引越来越多研究人员的目光。左手材料的负折射率特性可以使天线辐射电磁波波束聚焦, 因此天线的方向性和增益得到大幅提升; 后向波特性和实现相位补偿使微带天线突破 $\lambda/2$ 的限制轻易实现天线的小型化^[10]; 倏逝波放大效应可以放大较弱的电磁波信号,

增强天线的灵敏性。

正因为左手材料在电磁学、经典光学、光电子学、固态物理学、微波和天线工程和材料学以及纳米科学等诸多领域有广泛的应用前景^[11],各国政府和研究机构高度重视以左手材料为代表的新型人工电磁材料研发,美国政府多个政府部门如:海军航空系统司令部、美国空军、美国陆军都在进行相关研究。参与超材料研制的科研机构就有 18 家,包括: UC, Berkeley(加州大学伯克利分校)、 Duke University (杜克大学) 和 Imperial College London (伦敦大学帝国理工学院) 等在电磁学领域科研实力雄厚的大学。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 左手材料研究进展

在左手材料理论研究方面,D.R.Smith 于 2002 年提出了利用 S 参数反演法提取左手材料的等效电磁参数:等效介电常数、等效磁导率以及等效折射率等^[12],但是此方法只能用于提取均匀介质的等效电磁参数。2005 年他继续提出非均匀超材料电磁参数提取方法^[13],使 S 参数反演法成为提取非均匀人工电磁材料特性参数的主要方法。但是对于非对称非均匀介质,该算法无法得出唯一的等效阻抗。2010 年, Zsolt Szabo 等人提出了用 Kramers-Kronig 关系式保证电磁参数提取结果的唯一性^[14],但是此算法仅适用于介质的光学厚度远小于波长的情况。

在左手材料结构设计与制备方面,可以依据左手特性实现频段分为三类:微波频段、太赫兹频段以及红外可见光频段。

在微波频段,2006 年 D.Schruig 等人利用 SRR 环实现了微波频段的“隐身衣”,见图 1-1(a),这一成果成为当年十大科学突破之一^[15]。2010 年土耳其中东技术大学的 Ekmekci 等人用单环谐振结构实现了双频负磁导率^[16],见图 1-1(b)。但是该结构的负等效介电常数频段与负等效磁导率频段不重合,因此未能表现出双负特性。2014 年泰国北曼谷先皇技术大学的 Tanan Hongnara 提出 Minkowski 分型渔网结构的左手结构单元,可以明显降低左手材料谐振频点,大大减小左手材料的尺寸^[17],见图 1-1(c)。2015 年印度国家科技研究所的 Panda 等人用人工神经网络

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.