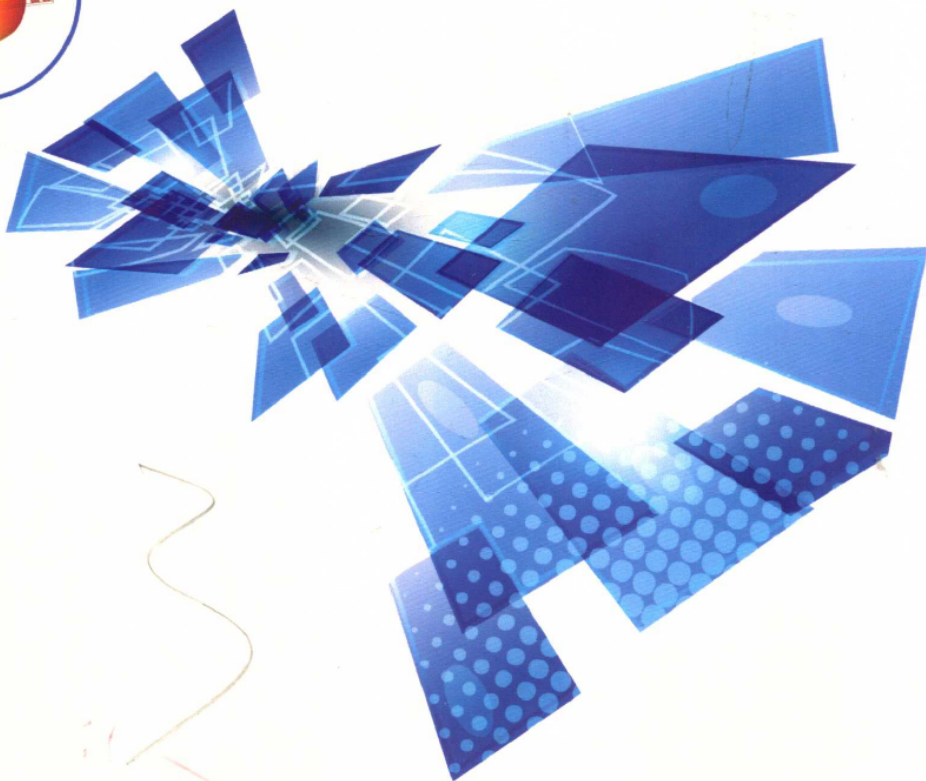


# 人工电磁结构 天线理论与设计

*Antenna Theory and Design*

*Based on Artificial Electromagnetic Structures*

曹文权 著



 东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

# 人工电磁结构天线理论与设计

曹文权 著



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

## 内 容 简 介

本书介绍了新型人工电磁结构天线的理论与设计。书中根据新型人工电磁结构的理论研究和特性分析,分别研究并设计了基于人工电磁结构的多频多模多极化天线、基于人工电磁结构的宽带天线、基于人工电磁结构的高增益天线、基于人工电磁结构的宽波束天线以及基于人工电磁结构的波束扫描天线。

本书适用于从事天线技术、雷达技术、新材料技术、无线通信技术的工程师或其他从事相关方面研究的科研人员阅读,同时也可以作为电磁场与微波技术领域大学教师的参考书和研究生的辅助教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

人工电磁结构天线理论与设计 / 曹文权著. —南京:  
东南大学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-5641-7834-5

I. ①人… II. ①曹… III. ①电磁场—介质—应用—  
天线—设计 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 033310 号

### 人工电磁结构天线理论与设计

Rengong Dianci Jiegou Tianxian Lilun Yu Sheji

---

著 者 曹文权  
出版发行 东南大学出版社  
社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096  
出 版 人 江建中  
责任编辑 姜晓乐(joy\_supe@126.com)  
网 址 <http://www.seupress.com>  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 虎彩印艺股份有限公司  
版 次 2019 年 4 月第 1 版  
印 次 2019 年 4 月第 1 次印刷  
开 本 700 mm×1000 mm 1/16  
印 张 12.25  
字 数 238 千  
书 号 ISBN 978-7-5641-7834-5  
定 价 48.00 元

---

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

# 前 言

随着无线通信、卫星通信和导航、雷达系统与军事电子对抗设备的迅速发展,通信系统对天线性能提出了更高的要求。尤其是基于印刷平板工艺的天线小型化、一体化、多频带、多功能以及波束控制技术已经日益成为天线领域的研究热点,传统技术已经很难满足越来越苛刻的性能指标。目前,新型人工电磁结构凭借其特有的电磁属性,成为物理、材料和电磁领域的研究前沿和热点。将人工电磁结构作为系统的一部分加载到天线中,将大大改善天线的近远场特性。本书从新型人工电磁结构的新颖电磁特性出发,重点介绍人工电磁结构在多功能、高增益、宽波束以及波束扫描天线设计中的应用。

人工电磁结构的实现一般可以用普通的金属结构或微带周期性和非周期性结构等效完成。因此,人工电磁结构天线在保证传统微带天线低剖面、易集成、低成本等优点的同时,能够发挥人工电磁结构在电磁波控制方面的独特优势,可以弥补传统天线在增益效率、匹配带宽以及波束灵活性等方面的缺陷。近十几年,关于人工电磁结构天线的报道越来越多,人工电磁结构天线方兴未艾,仍然有很多科学问题值得研究。本书以人工电磁结构作为研究对象,重点探讨人工电磁结构在多功能、高性能天线中的理论研究和设计应用。根据人工电磁结构的理论研究和特性分析,本书分别研究并设计了基于人工电磁结构的多频多模多极化天线、基于人工电磁结构的宽带天线、基于人工电磁结构的高增益天线、基于人工电磁结构的宽波束天线以及基于人工电磁结构的波束扫描天线。本书共分为8章,各章的内容如下:

第1章为绪论。阐述了新型人工电磁结构的概念、发展历史,介绍了人工电磁结构在天线领域的研究现状,列出了本书的具体内容以及主要贡献,并介绍了本书的结构安排。

第2章介绍了人工电磁结构的理论方法及特性分析。重点介绍了等效媒质的S参数提取法及等效电路模型的广义传输线法。分析了“工”字型、SRR及CSRR三种谐振结构和CRLH TL非谐振结构的电磁特性,为设计基于相关结构的人工电磁结构天线提供理论指导。

第3章介绍了基于人工电磁结构的多频多模多极化天线。理论分析了人工电磁结构天线的多频多模特性。采用切角、加弯折臂以及开斜槽等微扰方法,分

别设计实现了基于人工电磁结构的振子模式线/圆极化贴片模式线/圆极化四类新型天线。设计了基于人工电磁结构的圆形微带天线,实现了多频多模特性。

第4章介绍了基于人工电磁结构的宽带天线。设计了三款基于共面波导馈电的宽带紧凑型零阶谐振人工电磁结构天线。介绍了一款具有方向图可选择性和极化多样性的宽带人工电磁结构天线,实现了频率、方向图和极化同时可重构。基于可重构天线的概念,设计了一款单馈宽带双频双模双极化人工电磁结构天线。

第5章探讨了人工电磁结构在高增益天线中的应用。理论分析了人工电磁结构的各向异性模型,获得了人工电磁结构高增益天线的设计原则。在此基础上,设计了两款加载SRR和“工”字型谐振结构的宽带高增益天线。

第6章介绍了基于人工电磁结构的宽波束天线。基于谐振型人工电磁结构尺寸波长可比拟条件下的特性分析,研制了多款CSRR和“工”字型结构加载波束扫描天线。介绍了一种通过加载微带谐振结构控制圆极化微带天线波瓣宽度的方法,实现了低剖面圆极化宽波束天线的應用设计。

第7章介绍了基于人工电磁结构的波束扫描天线。基于频率调制连续波车载防撞雷达系统的指标要求,进行了基于CRLH TL的天线扫描范围和增益平坦度增强型的波束扫描天线阵列设计和基于相位调整栅格覆盖层加载的增益提高型波束扫描天线阵列设计。

第8章对本书的工作进行了总结,并对后续研究的一些方向进行了展望。

本书在编写的过程中得到了陆军工程大学通信工程学院各级领导的鼓励和支持。本书参阅并引入了大量国内外资料和经典著作内容,已列入各章节后的参考文献,在此谨向这些文献的作者们表示感谢。

由于时间仓促,加上水平和经验有限,虽然笔者竭尽全力来写好此书,但是难免还是会有不妥之处,敬请专家和读者批评指正。

曹文权

2019年1月24日

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	001
1.1 新型人工电磁结构的概念 .....	001
1.2 新型人工电磁结构的发展历史和现状 .....	003
1.2.1 起步阶段 .....	003
1.2.2 争议阶段 .....	004
1.2.3 快速发展阶段 .....	005
1.3 新型人工电磁结构在天线领域的研究现状 .....	006
1.3.1 新型人工电磁结构在小型化天线中的应用 .....	007
1.3.2 新型人工电磁结构在多频多模天线中的应用 .....	008
1.3.3 新型人工电磁结构在波束控制天线中的应用 .....	010
1.3.4 新型人工电磁结构在天线其他方面的应用 .....	012
1.4 本书主要内容及章节安排 .....	012
参考文献 .....	015
<b>第 2 章 新型人工电磁结构的理论方法及特性分析</b> .....	027
2.1 前言 .....	027
2.2 新型人工电磁结构的等效媒质参数提取 .....	028
2.3 几种谐振型人工电磁结构的电磁特性分析 .....	030
2.3.1 印刷 SRR 结构的电磁特性 .....	031
2.3.2 印刷 CSRR 结构的电磁特性 .....	037
2.3.3 印刷“工”字型谐振结构的电磁特性分析 .....	041
2.4 非谐振型人工电磁结构的电磁特性分析 .....	046
2.5 本章小结 .....	050
参考文献 .....	051
<b>第 3 章 基于人工电磁结构的多频多模多极化天线的理论分析与设计</b> <b>实现</b> .....	053
3.1 前言 .....	053

3.2	基于人工电磁结构的多频多模多极化天线的理论分析和模型建立	055
3.3	基于人工电磁结构的振子模式线极化贴片模式线极化天线设计	058
3.3.1	天线设计与分析	058
3.3.2	天线测试结果与讨论	060
3.4	基于人工电磁结构的振子模式线极化贴片模式圆极化天线设计	063
3.5	基于人工电磁结构的振子模式圆极化贴片模式线极化天线设计	064
3.5.1	天线设计与分析	064
3.5.2	天线测试结果与讨论	067
3.6	基于人工电磁结构的振子模式圆极化贴片模式圆极化天线设计	069
3.6.1	天线设计与分析	070
3.6.2	天线测试结果与讨论	073
3.7	基于人工电磁结构的多频多模圆形微带天线设计	075
3.7.1	天线设计与分析	075
3.7.2	天线测试结果与讨论	078
3.8	本章小结	080
	参考文献	081
<b>第4章</b>	<b>基于人工电磁结构的宽带天线分析与设计</b>	<b>084</b>
4.1	前言	084
4.2	基于人工电磁结构的宽带零阶谐振天线设计	086
4.2.1	天线设计与分析	086
4.2.2	天线测试结果与讨论	088
4.3	基于人工电磁结构的频率、方向图和极化同时可重构天线设计	091
4.3.1	天线设计与分析	092
4.3.2	天线测试结果与讨论	094
4.4	基于人工电磁结构的宽带双频双模双极化天线设计	097
4.4.1	复合左右手传输线的双频点相移特性	098
4.4.2	天线设计与分析	101
4.4.3	天线测试结果与讨论	104
4.5	本章小结	106
	参考文献	107
<b>第5章</b>	<b>基于人工电磁结构的高增益天线技术研究</b>	<b>112</b>
5.1	前言	112
5.2	人工电磁结构控制天线波束的机理分析	113

5.3	宽带周期端射天线模型 .....	114
5.4	基于 SRR 人工电磁结构的宽带高增益周期端射天线设计 .....	115
5.4.1	天线设计与分析 .....	116
5.4.2	天线测试结果与讨论 .....	119
5.5	基于“工”字型人工电磁结构的宽带高增益周期端射天线设计 .....	123
5.5.1	天线设计与分析 .....	123
5.5.2	天线测试结果与讨论 .....	127
5.6	本章小结 .....	130
	参考文献 .....	130
<b>第 6 章</b>	<b>基于人工电磁结构的宽波束天线技术研究 .....</b>	<b>133</b>
6.1	前言 .....	133
6.2	波长可比拟条件下谐振型人工电磁结构的电磁特性 .....	134
6.3	基于 CSRR 谐振结构的紧凑型波束扫描天线设计 .....	136
6.3.1	天线设计与分析 .....	137
6.3.2	天线测试结果与讨论 .....	139
6.4	基于“工”字型谐振结构的紧凑型波束扫描天线设计 .....	141
6.4.1	天线设计与分析 .....	142
6.4.2	天线测试结果与讨论 .....	144
6.5	基于弯折微带谐振结构加载的低剖面宽波束圆极化微带天线 .....	148
6.5.1	天线设计与分析 .....	148
6.5.2	天线测试结果与讨论 .....	152
6.6	本章小结 .....	154
	参考文献 .....	155
<b>第 7 章</b>	<b>基于人工电磁结构的波束扫描天线分析与设计 .....</b>	<b>158</b>
7.1	前言 .....	158
7.2	基于 CRLH TL 的波束扫描范围和增益平坦度增强型的波束扫描 天线阵列设计 .....	160
7.2.1	开槽阵列天线的理论分析 .....	160
7.2.2	传输线单元结构分析 .....	162
7.2.3	基片集成波导复合左右手传输线开槽阵列天线 .....	165
7.2.4	天线测试结果与讨论 .....	167
7.3	基于相位调整栅格覆盖层加载的增益提高型波束扫描天线阵列 设计 .....	168



7.3.1 基片集成波导开槽阵列天线馈电结构 .....	168
7.3.2 金属栅格设计 .....	170
7.3.3 天线参数分析 .....	173
7.3.4 天线测试结果与讨论 .....	176
7.4 本章小结 .....	178
参考文献 .....	179
<b>第 8 章 总结与展望 .....</b>	<b>183</b>
8.1 本书的主要工作 .....	183
8.2 后续工作和展望 .....	185
<b>致谢 .....</b>	<b>187</b>

---

# 第 1 章

## 绪 论

天线领域是一个充满着生机和活力的领域,在过去的近一百年里,天线技术已经成为通信革命不可缺少的伙伴。天线作为无线通信系统必备的终端组成部分,也被赋予了越来越多的应用重任,传统的天线技术手段已经很难满足系统的苛刻需求了。20 世纪末,新型人工电磁结构就在这种背景下应运而生了。人工电磁结构突破了传统电磁场理论中的一些重要概念,凭借其特异的电磁属性,已经逐渐成为国际物理、材料和电磁领域的研究前沿和热点,它于 2003 年和 2006 年两次被美国《Science》杂志评为年度十大科技突破之一,且于 2011 年被评为美国 21 世纪前十年的十大科技创新之一。将人工电磁结构应用到现代天线设计中,将大大改善天线的尺寸、阻抗和增益等电磁特性,获得常规天线所没有的特殊性能。

### 1.1 新型人工电磁结构的概念

新型人工电磁结构(Metamaterial)作为 20 世纪末出现的一个新学术词汇,拉丁语“meta-”赋予了这类人工电磁结构“超级”或“超越”的意义。对于“Metamaterial”一词,国际上没有一个权威严格的定义,国内翻译的版本也多种多样,有命名为“电磁超介质”,也有命名为“超材料”“左手材料”“双负材料”“负折射材料”“特异性材料”“特异介质”“人工电磁材料”等。根据维基百科的定义:“Metamaterials are artificial materials engineered to have properties that may not be found in nature. Metamaterials gain their properties not from their composition, but from their exactly-designed structures. These metamaterials achieve desired effects by incorporating structural elements of sub-wavelength sizes, i.e. features that are actually smaller than the wavelength of the waves they affect<sup>[1-3]</sup>.”我们可以看出 metamaterial 有三个特点:一是具有特异的电磁属性;二是特异的性质来源于人工设计的结构而不是物质本身;第三就是结构具有亚波长特性。考虑到结构对于 metamaterial 的重要性,本书采用“新型人工电磁结构”作为其中文名字进行分析。

众所周知,自然界的材料通常可以用两个电磁参数来描述,即介电常数( $\epsilon$ )

和磁导率( $\mu$ )。如果以这两个参数作为横纵坐标,可以将所有物质材料囊括在如图 1-1所示的介电常数和磁导率数值空间的四个象限内。

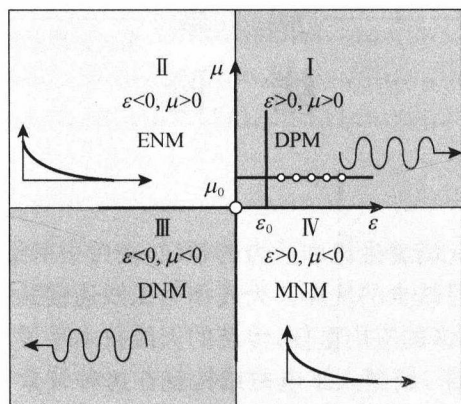


图 1-1 材料分类的介电常数-磁导率( $\epsilon$ - $\mu$ )示意图

实际上自然界存在的大多数物质都只是在第一象限内,而我们常用的物质基本上处在第一象限的  $\mu = \mu_0, \epsilon \geq \epsilon_0$  的一条直线中的离散点上。在第一象限内的物质,其材料介电常数( $\epsilon$ )和磁导率( $\mu$ )均为正值(DPM, Double Positive Material),电磁波的电场矢量、磁场矢量和波的传播方向满足右手螺旋定则,所以也称为“右手媒质”,支持前向波辐射。

事实上 metamaterial 的概念最早得到认可还是从“左手媒质(材料)”开始的,也就是图 1-1 中第三象限内的材料。该象限内的材料介电常数( $\epsilon$ )和磁导率( $\mu$ )都为负值,所以也称为“双负媒质(DNM, Double Negative Material)”。在双负媒质中,电磁波的电场矢量、磁场矢量和波的传播方向满足左手螺旋定则,所以也称为“左手媒质(LHM, Left Handed Material)”,支持后向波辐射。1967年,苏联物理学家 V. G. Veselago 首次报道了双负媒质具有逆多普勒效应、逆斯涅尔折射效应、增强倏逝波效应和逆切伦科夫辐射效应等特异属性,在理论上为人工电磁结构的研究奠定了基础<sup>[4]</sup>。

自然界中存在少数的电等离子体和磁等离子体材料,其在特殊的频段具有电单负( $\epsilon < 0, \mu > 0$ )和磁单负( $\mu < 0, \epsilon > 0$ )特性,对应为第二象限的电单负媒质(ENM, Electric Negative Material)和第四象限的磁单负媒质(MNM, Magnetic Negative Material),这两种媒质支持凋落波。更多的人工单负介电常数和单负磁导率媒质则是由谐振式金属结构<sup>[5-8]</sup>或者高介电常数介质块<sup>[9-10]</sup>组成。我们可以人为构造各种电谐振式结构单元和磁谐振式结构单元,通过电谐振和磁谐振的作用,在特定频段上分别实现  $\text{Re}(\epsilon) < 0$  和  $\text{Re}(\mu) < 0$ ,以适用于不同

频段单负媒质的需要。电磁波在单负媒质中以凋落波的模式存在,可以直接利用此类媒质的带阻特性设计一些具有带阻滤波功能的器件。相比于双负媒质需要在相同频段实现电负结构和磁负结构的重合,单负媒质因其更加简单的结构和更容易控制的特性受到越来越多学者的青睐。

此外,在坐标内还有比较特殊的一类,就是零折射媒质(ZRIM, Zero Refraction Index Material)<sup>[11-13]</sup>。因为折射率  $n = (\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$ ,无论是单负磁导率媒质还是单负介电常数媒质,都存在  $n \rightarrow 0$  的特殊频段。2006年, Silveirinha 和 Engheta 教授通过理论分析证明了电磁波通过 ZRIM 时会发生隧穿效应<sup>[12]</sup>;2007年,杜克大学 Smith 教授与东南大学崔铁军教授课题组通过设计互补型开口谐振环(CSRR, Complementary Split Ring Resonator)结构,实验验证了微波段的电磁隧穿效应<sup>[13]</sup>。

新型人工电磁结构已经逐渐具备了折射率任意可控的特性,世界各国的学者可以根据需要设计各向异性的新型人工材料或各种变换光学器件,实现对电磁波的精确定控<sup>[14-16]</sup>。

可见,最初的“左手材料”“双负材料”“负折射材料”显然只是人工电磁结构大家族中的一个部分,已经不能涵盖所有的人工电磁结构类型。对于结构的特性限制,也发生了一些变化,最初要求人工电磁材料为周期性亚波长结构,后来,非周期性结构也属于人工电磁结构。甚至有重视工程应用的学者,将亚波长的条件也逐渐放宽,认为只要具有常规材料所没有的特殊的电磁属性都属于新型人工电磁结构。

当然,人工电磁结构的电磁属性不是一成不变的,同一种人工电磁结构可能在不同的极化波和不同的频段出现不同的谐振模式,也即对应了不同的电磁特性,产生负介电常数或负磁导率的宏观效应。详细分析将在第2章给出。

## 1.2 新型人工电磁结构的发展历史和现状

虽然苏联科学家 V. G. Veselago 在《苏联物理学进展》上首次提出人工电磁结构的概念,但是由于缺乏实验验证,起初并没有引起学界的足够重视。这一新兴领域在经历了三十年的沉寂后,在20世纪末开始焕发生机,经历了起步阶段、争议阶段和快速发展阶段。

### 1.2.1 起步阶段

V. G. Veselago 教授从理论上研究了各向同性左手媒质的传播特性<sup>[4, 17]</sup>,并预测了一系列特异的物理现象<sup>[18-21]</sup>。然而由于自然界中并没有发现左手材料,他

的研究成果没有得到深入研究。1996—1999 年间,英国皇家理工学院的 J. B. Pendry 教授先后由周期性排列的细金属棒(Rod)阵列和金属谐振环(SRR, Split Ring Resonator)构造的人工电磁结构实现了微波段的负等效介电常数和负等效磁导率<sup>[22-24]</sup>,如图 1-2 所示。2001 年,美国加州大学圣地亚哥分校的 David Smith 等物理学家根据 Pendry 教授的理论模型,将细金属丝板和 SRR 有规律地排列在一起,实现了微波段(4.2 GHz~4.6 GHz)的双负人工电磁材料,并通过著名的“棱镜实验”证明了左手材料的存在,从此开启了新型人工电磁结构研究的序幕<sup>[25-26]</sup>。

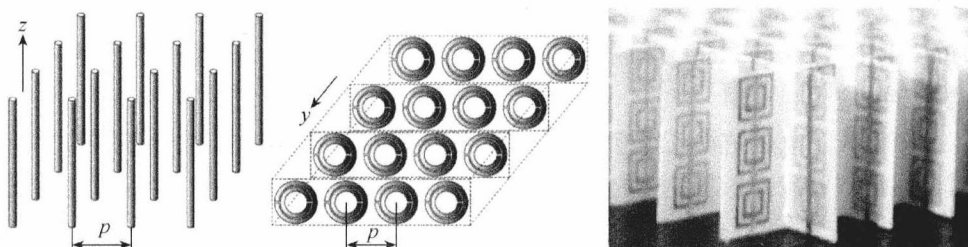


图 1-2 能分别实现单负介电常数、单负磁导率及双负左手媒质的三种周期结构

自从证明了左手材料的存在后,人工电磁结构迅速成为国际物理学界、电磁学界、材料界和工业界的研究热点。Pendry 教授等提出了“完美透镜”的概念,指出左手媒质可以用于放大或恢复倏逝波<sup>[27]</sup>,很多学者纷纷进行理论和实验验证<sup>[28-35]</sup>;麻省理工学院孔金鸥教授分析了电磁波在左手媒质的多层结构中的传播特性,指出人工电磁材料可以用来制造高指向性天线、聚焦微波波束、实现电磁隐身等<sup>[36-38]</sup>。

然而,由于 Smith 教授等人实现左手材料的单元结构基于强谐振特性,损耗大,频带窄,且要实现介电常数和磁导率在同一频段上同时为负比较困难。为克服这些不足,很多学者致力于寻求其他改良的谐振单元结构来构成左手媒质<sup>[39-44]</sup>。比较具有代表性的是 Ran 和 Chen 等人于 2004 年分别设计出的  $\Omega$  谐振单元和 S 形谐振单元<sup>[45-46]</sup>。 $\Omega$  结构将细铜导线和 SRR 组合在一个图形中,能够有利于电路的制作并可以利用多层结构制作全固态的左手媒质<sup>[45]</sup>。S 形谐振单元也同时具有负介电常数和负磁导率响应<sup>[46]</sup>。两种结构损耗小、带宽大、性能稳定。

### 1.2.2 争议阶段

尽管新型人工电磁结构的研究潜力是巨大而充满魅力的,但是其研究过程也不是一帆风顺的,很多专家学者对其存在的合理性提出了诸多质疑。首先是 2002 年,Valanju 和 Garcia 等人发表文章质疑左手媒质存在的合理性,他们认为

左手媒质违背了因果定律和群速不可超过光速两个物理量的限制<sup>[47-48]</sup>。但是,孔金瓯教授指出能量传播的方向应该通过计算各处的坡印廷矢量的方向来决定,而不是 Valanju 等人认为的波的干涉波纹前进方向<sup>[49]</sup>。Pendry 和 Smith 也通过原始定义获得群速在左手材料中沿负方向折射的结论<sup>[50]</sup>。Foteinopoulou S 通过时域仿真发现在左手媒质传播的电磁波符合因果定律,而在左手媒质和常规媒质临界处将经历很长的延时才向折射角为负的方向折射<sup>[51]</sup>。

另一个争论的热点则是关于完美透镜的理论<sup>[27, 52]</sup>。Garcia 等科学家认为完美透镜理论将违背不确定原理,导致无穷大能量密度的出现<sup>[53]</sup>。G. Gomez-Santos 通过引入时间量程的概念,消除了 Garcia 提到的分歧问题<sup>[30]</sup>。此外,东南大学崔铁军教授从 Maxwell 方程和 Poynting 理论出发,基于能量守恒原理和时域分析方法证明了 Lorentz 模型在任何频率下的功率密度均为正值,消除了对于传统能量定义之下左手媒质能量为负的误解<sup>[54]</sup>。

还有一些学者对左手材料负折射现象的实验提出了质疑,认为很多负折射现象只是近场衍射的效应,忽略了材料的损耗,棱镜实验测到的现象有可能是由高损耗引起的。甚至有学者使用高损耗、正折射率媒质重复棱镜实验时,在负方向检测到了比正方向更大的功率。为反驳这些质疑,国内外学者纷纷重复实验以证明左手材料确实是存在的。C. G. Parazzoli 等人在自由空间重复棱镜实验,验证了 Smith 左手材料的负折射特性<sup>[55-57]</sup>; A. A. Houck 和冉立新等人在平面波导中验证了负折射现象<sup>[58-59]</sup>;此外,浙江大学的学者们还通过高斯波束位移实验、T 型波导实验方法、等效参数提取方法等进一步验证了负折射特性<sup>[60-62]</sup>。

迄今为止,有关左手材料的争议已经基本结束,左手材料的存在性得到了认可。

### 1.2.3 快速发展阶段

近几年来,新型人工电磁结构无论是在理论研究、结构设计,还是实验验证、应用研究方面均取得了诸多突破,逐渐形成了一门理论体系完整、实验论证严密、应用前景广泛的新兴学科。

新型人工电磁结构的理论研究主要集中在新型人工电磁结构的负折射率和后向波辐射特性,包括了负能量和能流变化问题、负色散特性、相速与群速问题、导波模式问题、表面波抑制等一系列电磁学问题<sup>[63-72]</sup>。此外,国内外学者也对人工电磁结构其他新颖现象和应用做了很多理论分析。例如,Ruppin 对左手媒质中电磁能量和表面极化进行了分析<sup>[73]</sup>; Chowdhury A 和 Hu 等人分别分析了左手媒质的非线性特性和各向异性特性<sup>[74-75]</sup>;崔铁军教授提出了利用左手媒质实现

能量局域化,以及能够传输超大功率密度的超级波导等<sup>[76-78]</sup>。

在工作频段上,新型人工电磁结构已经涵盖了包括微波、毫米波、太赫兹波和光波在内的各个频段。Zhang 通过  $\mu$ SL 系统合成大长径比的金属线阵列获得了 0.7 THz 的等离子频率<sup>[79]</sup>;Yen 等人采用光刻蚀技术获得了负磁导率效应在红外波段的铜 SRRs 阵列<sup>[80]</sup>;此外,金属/电介质复合媒质也被 Shalaev 等人验证了可用于构造可见和红外波段的左手媒质<sup>[81-82]</sup>;S. O'Brien 和 J. Li 等人构造出了红外波段纳米结构的对称环 SRR 结构左手材料<sup>[83-84]</sup>。

在实现形式上,新型人工电磁结构已经完全超出了最初的左手材料范畴。这些新途径包括光子晶体、手征媒质、回旋媒质、超导媒质、LTCC 技术和双轴晶体等,多种形式的人工电磁结构极大地拓展了理论与实验研究内容。Mocella、Pendry、Tretyakov、Ricci 以及国内浙江大学何塞灵教授、东南大学崔铁军教授、南京大学冯一军和伍瑞新教授、西北工业大学赵晓鹏教授等人走在了该领域的前列。

在人工电磁结构的众多实现方式当中,逐步形成完善理论和实验应用体系的复合左右手传输线(CRLH TL)结构凭借其特有的属性得到了广泛的推广。多伦多大学 George V. Eleftheriades 教授和加州大学 Tatsuo Itoh 教授于 2002 年分别独立提出了左手传输线的思想<sup>[85-86]</sup>。考虑到实际左手传输线中存在寄生的右手效应,Itoh 教授又提出了更贴近实际的复合左右手结构的概念<sup>[87]</sup>。与谐振型人工电磁结构相比,CRLH TL 结构具有频带宽、损耗低、小型化、易集成等特性,在微波射频领域有着广阔的应用前景。国内外科学家将 CRLH TL 和微带、共面波导、基片集成波导等技术相结合,制作出许多新颖的微波器件和新型天线<sup>[88-92]</sup>。

近几年,基于新型人工电磁结构的新型天线研究逐渐得到重视,是新型人工电磁结构领域最具活力的方向之一。迄今为止,新型人工电磁结构的理论工作已经相对成熟,而结构研制的目的又往往服务于应用研究。将新型人工电磁结构的众多特性能应用于现代微波领域,给传统的微波理论带来突破性的发展。特别是,将新型人工电磁结构加载到天线中,能够给天线的物理尺寸、制造成本和性能指标等方面带来新的改善,有利于促进新型天线在通信系统中的应用。近几年来,天线类国际顶级期刊发表的关于新型人工电磁结构天线的论文呈现逐年上升的趋势。尽管如此,新型人工电磁结构天线的应用研究方兴未艾,是极具探索价值的新兴领域。

### 1.3 新型人工电磁结构在天线领域的研究现状

天线是无线通信系统中辐射或接收电磁波的能量转换装置,起着导行波(或高频电流)与空间电波之间的转换功能,是系统必不可少的一部分。随着通信系统的发展,天线技术越来越朝着小型化、多功能、灵活性、高性能方向发展。根据天线性

可以将新型人工电磁结构在天线中的应用分为以下几个方面:新型人工电磁结构在小型化天线中的应用、新型人工电磁结构在多频多模天线中的应用、新型人工电磁结构在波束控制天线中的应用以及新型人工电磁结构在天线其他方面的应用。

### 1.3.1 新型人工电磁结构在小型化天线中的应用

国际上有众多研究团队在新型人工电磁结构小型化天线应用方面成果显著。

美国加州大学洛杉矶分校的 Tatsuo Itoh 教授和他的课题组依据 CRLH TL 相位补偿特性设计制作了多副小型化天线。当 CRLH TL 谐振天线终端短路时,可以制作零阶谐振天线(ZORA, Zeroth Resonant Antenna)<sup>[93-95]</sup>。结构的零阶谐振特性使电小天线得以实现<sup>[96]</sup>。天线小型化使其易集成于射频器件中<sup>[97]</sup>。另外,课题组还采用 CRLH TL 理论对周期 mushroom 结构进行分析,论证并实现了具有单极子辐射方向图的无限波长谐振天线<sup>[98]</sup>。

加拿大多伦多大学 George V. Eleftheriades 教授领衔的课题组通过对单极子天线加载单个或多个人工电磁结构单元实现了一类能应用于 Wi-Fi、WiMAX 等移动通信系统中的小型化低剖面天线<sup>[99-105]</sup>。课题组首先制作了两个在天线工作频率处插入相位为零的人工电磁结构单元,使得天线近似两个同相探针辐射,既实现了小型化( $1/10\lambda_0$ ),又保证了低剖面( $1/28\lambda_0$ )<sup>[99]</sup>;随后采用折叠振子技术增加电小单极子的辐射阻抗,无须额外的阻抗匹配网络,结构更加简单,也大大提高了天线辐射效率<sup>[100]</sup>。此外课题组还构造了两个谐振在不同频段的分支,在保证小型化的基础上拓宽了天线带宽<sup>[101]</sup>。

美国亚利桑那大学 Richard W. Ziolkowski 教授和他的研究团队在具有近场谐振寄生特性的多功能电小天线方面研究成果丰富。他分析了电小天线周围覆盖双负或单负人工电磁结构单元的辐射性能<sup>[106]</sup>。研究表明,加载新型人工电磁结构单元可有效提高电小天线的辐射效率和阻抗带宽。基于电和磁的近场谐振寄生单元的电小和磁小偶极子天线,能够与单馈点  $50\ \Omega$  很好地匹配,辐射效率高<sup>[107]</sup>。随后课题组又结合近场谐振寄生特性和电磁带隙结构(EBG, Electromagnetic Band-Gap)实现了具有高方向性和低剖面特性的线极化/圆极化电小天线<sup>[108]</sup>。在此基础上,通过引入多个近场谐振寄生单元,又获得了双频线极化和圆极化的小型化天线<sup>[109]</sup>。如图 1-3 所示为近场谐振寄生型多功能电小天线。

美国宾夕法尼亚大学的 Nader Engheta 教授首次提出了用双负材料实现亚波长谐振腔的理论。他给出了一维谐振腔的平行加载方式,并指出,根据双负材料的逆向波特性和,一维谐振腔加载具有双负特性的平板材料可以实现对传统平板材料的相位补偿,使得谐振腔的厚度不再受半波长的限制,其谐振条件仅取决于两块平板的厚度与电磁参数的比值关系<sup>[110]</sup>。美国得克萨斯大学奥斯汀分校 Andrea Alu 教授等人对亚波长谐振腔应用于微带天线的可行性进行了分析,设



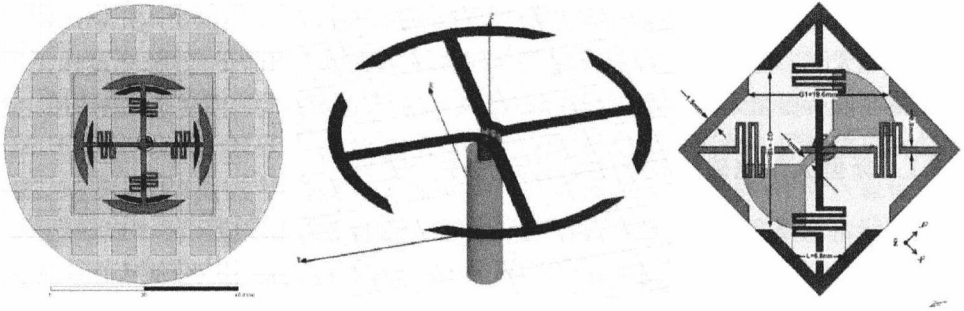


图 1-3 近场谐振寄生型多功能电小天线

设计了一款圆形亚波长微带贴片天线,此天线的谐振频率与天线物理尺寸无关,仅与材料的本构参数和填充比有关。在谐振频率上辐射贴片直径仅为  $0.065\lambda_0$ ,其尺寸远小于传统微带天线的半波长<sup>[111-112]</sup>。国内南京大学冯一军教授、哈尔滨工业大学吴群教授和西安电子科技大学杨锐博士等对亚波长的谐振腔天线也做了深入的研究<sup>[113-115]</sup>。

天线小型化是天线的重要发展方向之一。目前,新型人工电磁结构的小型化天线成果颇多。Shu-Yen Yang 等通过加载交趾电容传输线实现了一款尺寸为  $0.11\lambda_0 \times 0.18\lambda_0 \times 0.01\lambda_0$ ,带宽达到 6.1% 的零阶谐振天线<sup>[116]</sup>,如图 1-4 所示。M. S. Majedi 等则通过使用 ENM 传输线结合共面条带结构实现了小型化零阶谐振天线,天线尺寸为  $0.10\lambda_0 \times 0.08\lambda_0$ ,带宽达到了 12.4%<sup>[117]</sup>。Parviz Hajizadeh 用人工电磁结构替代近似八木天线的辐射部分,天线尺寸减少了 76.24%<sup>[118]</sup>。

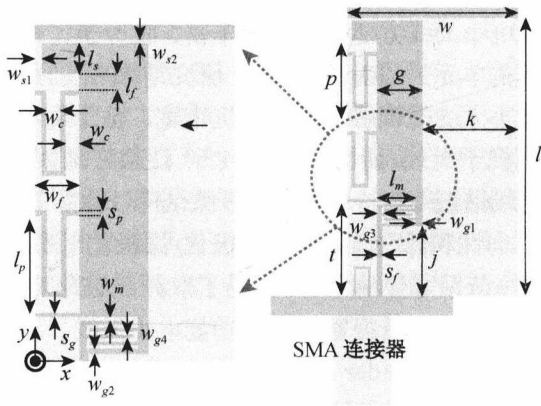


图 1-4 加载交趾电容传输线的零阶谐振天线

### 1.3.2 新型人工电磁结构在多频多模天线中的应用

基于新型人工电磁结构的多频多模天线初见成果,G. V. Eleftheriades 教授