复合左右手传输线

在天馈线系统中的应用研究

曾会勇　宗彬锋　张　秦　耿　林　王光明　著

非外借

西北工业大学出版社

复合左右手传输线在天馈线系统中的应用研究

曾会勇　宗彬锋　张　秦　耿　林　王光明　著

西北工业大学出版社

西　安

【内容简介】 本书依据复合左右手传输线的双/多频特性、宽带移相特性、小型化特性及零/负阶谐振特性，采用理论分析、电路等效、数值计算、软件仿真和实验测量等手段，深入研究了复合左右手传输线在双频微带天线阵列、宽带圆极化天线阵列、双圆极化和差波束形成网络及小型全向圆极化天线中的应用理论和工程设计问题。研究成果解决了传统天馈线系统中的双频、宽频、小型化和圆极化等难题，具有很高的实际应用价值。本书内容主要包括基于平衡复合左右手传输线的双频微带天线阵列、基于单一复合左右手传输线的宽带圆极化天线阵列、基于复合左右手移相器的双圆极化和差波束形成网络及基于单负零阶谐振器的小型全向圆极化天线等。

本书可供从事微波以及复合左右手传输线的理论研究和应用的工程技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合左右手传输线在天馈线系统中的应用研究/曾会勇等著．—西安：西北工业大学出版社，2019.8

ISBN 978-7-5612-6517-8

Ⅰ.①复… Ⅱ.①曾… Ⅲ.①传输线理论-研究 Ⅳ.①TN81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 182895 号

FUHE ZUOYOUSHOU CHUANSHUXIAN ZAI TIANKUIXIAN XITONGZHONG DE YINGYONG YANJIU

复合左右手传输线在天馈线系统中的应用研究

责任编辑：朱辰浩		**策划编辑**：杨　军	
责任校对：张　潼		**装帧设计**：李　飞	
出版发行：西北工业大学出版社			
通信地址：西安市友谊西路 127 号		邮编：710072	
电　　话：(029)88491757，88493844			
网　　址：www.nwpup.com			
印 刷 者：陕西金德佳印务有限公司			
开　　本：710 mm×1 000 mm	1/16		
印　　张：10.875			
字　　数：201 千字			
版　　次：2019 年 8 月第 1 版		2019 年 8 月第 1 次印刷	
定　　价：68.00 元			

如有印装问题请与出版社联系调换

前　言

新材料的探索和开发一直是人类不懈的奋斗目标和进步手段，有别于传统材料的左手材料已成为当今最具活力的研究领域之一，作为左手材料重要实现方式的复合左右手传输线更引起了研究人员的极大关注。当前，复合左右手传输线的理论和应用研究已在微波技术领域深入展开，特别是在天馈线系统中的应用研究已成为热点。本书依据复合左右手传输线的双/多频特性、宽带移相特性、小型化特性及零/负阶谐振特性，采用理论分析、电路等效、数值计算、软件仿真和实验测量等手段，深入研究了复合左右手传输线在双频微带天线阵列、宽带圆极化天线阵列、双圆极化和差波束形成网络及小型全向圆极化天线中的应用理论和工程设计问题。研究成果解决了传统天馈线系统中的双频、宽频、小型化和圆极化等难题，具有很高的实际应用价值。

本书的主要内容如下：①基于交指缝隙和接地过孔结构，提出新型复合左右手传输线结构。交指缝隙等效为串联电容，提供负磁导率效应，接地金属过孔等效为并联电感，提供负介电常数效应；通过色散曲线证明该结构为复合左右手传输线，并提出结构的等效电路模型；分析复合左右手传输线单元的传输特性，发现其左手通带和右手通带均单独可调，且在平衡条件下具有带通滤波特性，在非平衡条件下具有双频滤波特性。②基于提出的新型复合左右手传输线结构，设计双频微带天线阵列。首先，利用提出的复合左右手传输线在平衡条件下的带通滤波特性，分别设计新型的C波段和X波段的复合左右手带通滤波器；其次，结合复合左右手带通滤波器设计新型复合左右手双工器，有效实现C波段和X波段的分离，该双工器是单平面结构，设计方法简单，占用面积小，十分适用于天线馈电网络；最后，设计工作于C/X波段的天线单元及4元天线子阵，并结合复合左右手双工器实现了C/X波段的双频微带天线阵列。③基于复合左右手传输线的宽带移相特性，提出单一复合左右手传输线的宽带移相器设计方法。从理论上分析单一复合左右手传输线的色散特性，给出相移常数的表达式；提出利用单一复合左右手传输线的非线性相位特性设计宽带移相器的方法，相比复合左右手传输线，该方法简单易行。④基于提出的宽带移相器的设计方法，设计顺序旋转馈电的宽带圆极化天线阵列。首先，分析顺序旋转阵列中天线单元的极化特性、馈电幅度比和馈电相位差对阵

列圆极化特性和增益特性的影响；其次，根据提出的单一复合左右手传输线宽带移相器的设计方法，分别设计宽带 90°移相器和 180°移相器，以及具有宽带相位差的 4 元顺序旋转馈电网络；最后，结合宽带圆极化天线单元设计 4 元宽带圆极化天线阵列。⑤基于提出的宽带移相器的设计方法，设计宽带双圆极化和差波束形成网络。首先，给出并计算验证 8 元顺序旋转圆极化天线阵列中产生和波束与差波束的馈电相位表达式；其次，给出实现和差波束幅相关系的和波束形成网络及差波束形成网络的拓扑结构，并详细分析其工作原理；最后，利用提出的单一复合左右手传输线宽带移相器的设计方法，分别设计宽带 45°移相器、90°移相器和 180°移相器，结合宽带三分支 3 dB 分支线耦合器和威尔金森功分器，按照和差网络的拓扑结构分别设计宽带双圆极化和波束及差波束形成网络。⑥基于复合左右手传输线的零阶谐振特性，对比分析蘑菇阵列的双负零阶谐振天线和单负零阶谐振天线的全向辐射特性。分析结果表明，单负零阶谐振天线具有更加对称的全向方向图和更低的交叉极化，且结构简单，易于实现，因此，在设计全向天线时采用单负零阶谐振天线更具优势。⑦基于单负零阶谐振天线良好的全向辐射特性，设计蘑菇阵列的小型全向圆极化天线。蘑菇结构的单负零阶谐振天线可等效为电偶极子天线，在地板上加载环形支节可获得环向电流，环向电流可等效为磁偶极子天线；通过调节加载支节，使等效的电、磁偶极子天线具有相同幅度和 90°相位差，可在方位面实现全向圆极化辐射；相比传统谐振天线，所设计的天线实现了小型化。

本书的研究工作和出版得到了国家自然科学基金项目（项目编号：61701527，61372034，61601499）和陕西省自然科学基础研究计划（项目编号：2019JQ－583）的部分资助。

本书可以帮助相关工程技术和研究人员了解复合左右手传输线的理论技术，解决有关应用问题。

本书内容以曾会勇博士攻读博士阶段的研究成果为主，其他署名作者也做了大量细致的工作。其中宗彬锋主要负责第 1 章的编写，张秦主要负责第 2 章的编写，耿林主要负责第 3 章的编写，王光明主要负责第 4 章的编写，曾会勇主要负责第 5，6 章的编写。

写作本书曾参阅了相关文献、资料，在此，谨向其作者深表谢忱。

由于笔者水平有限，书中难免存在一些缺点和不足之处，恳请广大读者批评、指正并提出宝贵意见和建议。

著　者

2019 年 5 月

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　复合左右手传输线的特性分析 …… 2

1.2　复合左右手传输线在天馈线系统中的应用研究现状 …… 5

1.2.1　复合左右手传输线在天线单元中的应用现状 …… 8

1.2.2　复合左右手传输线在馈线系统中的应用现状 …… 13

1.2.3　复合左右手传输线在天线阵列中的应用现状 …… 22

第 2 章　基于平衡复合左右手传输线的双频微带天线阵列 …… 27

2.1　双频天线的研究现状 …… 28

2.1.1　双/多频天线单元的研究现状 …… 28

2.1.2　双频天线阵列的研究现状 …… 30

2.2　新型复合左右手传输线 …… 34

2.2.1　结构模型 …… 34

2.2.2　色散曲线 …… 36

2.2.3　等效电路模型 …… 37

2.3　复合左右手传输线传输特性分析 …… 38

2.4　复合左右手双工器设计 …… 42

2.4.1　复合左右手带通滤波器 …… 43

2.4.2　复合左右手双工器 …… 44

2.5　双频微带天线阵列设计 …… 47

2.5.1　天线单元及子阵 …… 47

2.5.2　双频天线阵列 …… 50

2.6　小结 …… 52

第 3 章　基于单一复合左右手传输线的宽带圆极化天线阵列 …… 54

3.1　顺序旋转阵列的特性分析…… 55
3.1.1　顺序旋转阵列理论…… 55
3.1.2　圆极化特性分析…… 57
3.1.3　增益特性分析…… 68
3.2　单一复合左右手传输线宽带移相器设计方法…… 69
3.2.1　宽带移相器的研究现状…… 70
3.2.2　单一复合左右手传输线分析…… 71
3.2.3　超宽带移相器设计…… 73
3.3　宽带相移顺序旋转馈电网络设计…… 75
3.3.1　宽带 90°移相器 …… 76
3.3.2　宽带 180°移相器 …… 78
3.3.3　宽带相移顺序旋转馈电网络…… 81
3.4　宽带圆极化天线阵列设计…… 83
3.4.1　宽带圆极化天线单元设计…… 83
3.4.2　天线阵列仿真结果及分析…… 85
3.4.3　天线阵列实验结果及分析…… 87
3.5　小结…… 89

第 4 章　基于复合左右手移相器的双圆极化和差波束形成网络 …… 90

4.1　和差网络馈电相位分析…… 91
4.1.1　和网络相位分析…… 92
4.1.2　差网络相位分析…… 95
4.2　和差网络结构分析…… 99
4.2.1　和网络结构…… 99
4.2.2　差网络结构 …… 102
4.3　和差网络关键器件设计 …… 103
4.3.1　耦合器和功分器设计 …… 103
4.3.2　45°移相器设计 …… 105
4.3.3　90°移相器设计 …… 106
4.3.4　180°移相器设计 …… 107
4.4　和差网络实验结果 …… 108

4.4.1 和网络实验结果 …… 108
4.4.2 差网络实验结果 …… 115
4.5 小结 …… 121

第5章 基于单负零阶谐振器的小型全向圆极化天线 …… 123

5.1 全向圆极化天线的研究现状 …… 124
5.2 蘑菇阵列单负零阶谐振全向天线 …… 127
5.2.1 单负零阶谐振特性分析 …… 127
5.2.2 蘑菇阵列单负零阶谐振天线 …… 130
5.3 基于单负零阶谐振器的小型全向圆极化天线 …… 134
5.3.1 仿真结果 …… 134
5.3.2 实验结果 …… 139
5.4 小结 …… 143

第6章 结束语 …… 145

参考文献 …… 148

第1章 绪 论

有别于传统材料的左手材料已成为当今最具活力的研究领域之一，左手材料与传统的右手材料互为对偶，很多性质是互补的。作为左手材料重要实现方式的复合左右手(Composite Right/Left - Handed, CRLH)传输线更引起了研究人员的极大关注，复合左右手传输线概念的提出，不仅丰富了传输线理论，更重要地是开启了人们自由控制传输线的色散曲线这扇大门，改变了传统微波器件的设计理念。

左手材料的首次提出是在1967年，苏联物理学家Veselago同时改变介电常数ε和磁导率μ的符号，麦克斯韦方程仍然成立，此时电场、磁场与波矢量之间构成左手螺旋关系，Veselago将之命名为“左手材料”[1]，由于自然界从未发现这样的物质，这一颠覆性的概念一直无人问津；直到1999年英国皇家学院的Pendry教授首次从理论上证明了左手材料的存在[2-3]，Veselago的开拓性工作才引起关注；根据Pendry教授的理论，2001年美国麻省理工学院的Smith教授首次人工合成了“块状”左手材料[4-5]，此后，左手材料逐渐成为了物理学界和电磁学界的研究热点；2002年，Itoh教授和Eleftheriades教授几乎同时提出了传输线结构的左手材料，称为复合左右手传输线法[6-9]，复合左右手传输线避免了“块状”左手材料的谐振结构，其传输响应和频率范围均能满足微波电路的要求，具有频带宽和损耗低的优点，易于在微波电路中应用。

天线作为发射和接收电磁波的设备，处于微波无线通信和探测系统的最前端，它的性能对整个系统有非常重要的影响；馈线系统的功能是保证天线阵列中各天线单元的幅度和相位按需分布，是影响天线阵列总体性能的关键。目前，复合左右手传输线的理论与应用研究已在微波技术领域深入展开，特别是在天馈线系统中的应用研究已成为热点。复合左右手传输线的非线性色散曲线及相位常数可在实数域内任意取值，使其具有传统传输线所不具备的双/多频特性、宽带移相特性、小型化特性及零/负阶谐振特性，因此，基于复合左右手传输线的微波器件具有许多传统结构不具备的功能。利用复合左右手传输线可设计双/多频、宽频、小型和圆极化的天馈线系统，在军用和民用方面都具有重要意义和广阔应用前景。

在军用方面，随着高速集成电路的快速发展，现代电子战武器装备必然要朝多功能一体化、小型集成化、多频段、宽带化和智能化方向不断迈进，虽然当今雷达的主流是有源相控阵雷达，但未来的发展趋势是数字雷达。这种雷达体积小、质量轻、造价低且工作频带宽，因此天馈线系统作为雷达系统的关键部件，也要求体积小和工作频带宽[10]。在民用方面，现代通信正向着高速及宽频方向发展，但目前能够使用的频谱资源是有限的，单频段通信系统已不能很好地满足无线通信的需求，双/多频通信系统是今后无线通信发展的方向[11]，作为通信系统重要组成部分的天馈线系统也应朝双/多频方向发展。因此，无论是从军用还是从民用来说，设计出体积小、频带宽及双/多频的天馈线系统都有重大的意义。

综上所述，复合左右手传输线法的提出，为研究左手材料的物理机制提供了一个重要方法，同时为复合左右手传输线的设计提供了理论依据。目前，复合左右手传输线在微波工程中的应用研究大多集中在天线单元和单个微波器件方面，而在天线阵列及阵列馈线系统方面的研究文献较少，许多问题有待深入研究。针对军事实用化难题，进行深入的理论和应用研究，包括复合左右手传输线新型结构的实现，特殊性能和工作机理的研究，分析方法和设计步骤的归纳及工程应用的实现等，使复合左右手传输线在天馈线系统中得到应用，具有重要的理论意义和实用价值。

1.1 复合左右手传输线的特性分析

由于电场、磁场与波矢量构成左手螺旋关系，基于传输线结构的左手材料被称为左手传输线，为便于对比，传统传输线被称为右手传输线。由电磁场理论可知，当电磁波通过传输线时会产生分布参数效应，因为实际结构中不可避免地存在寄生串联电感和并联电容所产生的右手效应。其中寄生电容是由电压梯度产生的，寄生电感是由电流沿金属化方向的流动产生的[12]。可见，理想的左手传输线并不存在，因此就出现了复合左右手传输线的概念，许多文献也称为左右手传输线。随着研究的深入，相继出现了广义复合左右手传输线[13]、对偶复合左右手传输线[14]及单一复合左右手传输线等新概念[15]，将这些类型均归为复合左右手传输线的范畴，作为复合左右手传输线的拓展研究内容。

在忽略损耗的情况下，右手传输线、左手传输线和复合左右手传输线的电路模型分别如图 1-1～图 1-3 所示。

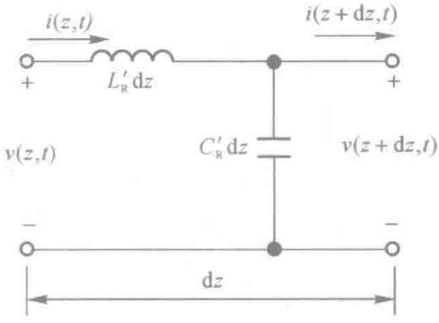


图 1-1　右手传输线的集总参数等效电路

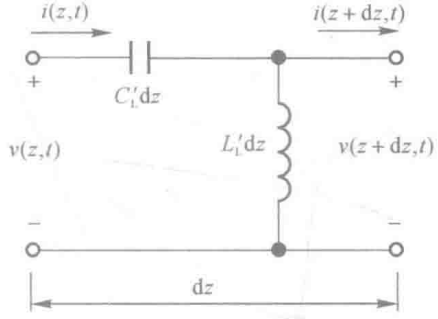


图 1-2　左手传输线的集总参数等效电路

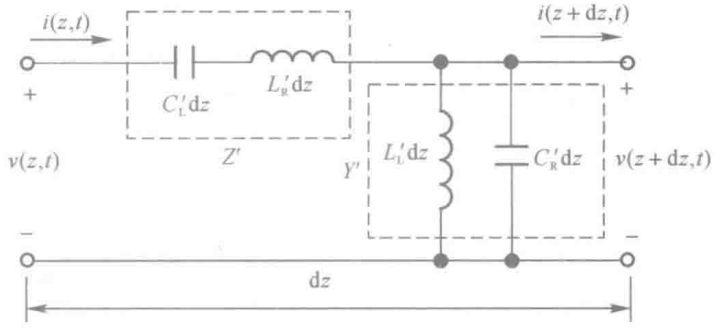


图 1-3　复合左右手传输线的集总参数等效电路

由图 1-1 可知，对于右手传输线，单位长度的串联阻抗和并联导纳分别为 $Z'_R = j\omega L'_R$ 和 $Y'_R = j\omega C'_R$，传播常数为 $\gamma_R = \sqrt{Z'_R Y'_R} = \sqrt{(j\omega L'_R)(j\omega C'_R)} = j\beta_R$，$\beta_R$ 为相位常数。则右手传输线的相位常数为

$$\beta_R(\omega) = \omega \sqrt{L'_R C'_R} \tag{1-1}$$

同理，根据图 1-2 和图 1-3 可分别计算左手传输线和复合左右手传输

线的相位常数分别为

$$\beta_{\mathrm{L}}(\omega) = -\frac{1}{\omega\sqrt{L'_{\mathrm{L}}C'_{\mathrm{L}}}} \tag{1-2}$$

$$\beta_{\mathrm{LR}}(\omega) = s(\omega)\sqrt{\omega^2 L'_{\mathrm{R}}C'_{\mathrm{R}} + \frac{1}{\omega^2 L'_{\mathrm{L}}C'_{\mathrm{L}}} - \left(\frac{L'_{\mathrm{R}}}{L'_{\mathrm{L}}} + \frac{C'_{\mathrm{R}}}{C'_{\mathrm{L}}}\right)} \tag{1-3}$$

式中

$$s(\omega) = \begin{cases} -1, \omega < \omega_{\Gamma 1} = \min\left(\dfrac{1}{\sqrt{L'_{\mathrm{R}}C'_{\mathrm{L}}}}, \dfrac{1}{\sqrt{L'_{\mathrm{L}}C'_{\mathrm{R}}}}\right) \\ +1, \omega > \omega_{\Gamma 2} = \max\left(\dfrac{1}{\sqrt{L'_{\mathrm{R}}C'_{\mathrm{L}}}}, \dfrac{1}{\sqrt{L'_{\mathrm{L}}C'_{\mathrm{R}}}}\right) \end{cases} \tag{1-4}$$

式(1-3)中的相位常数 β_{LR} 可以是纯实数或纯虚数。在 β_{LR} 是纯实数的频率范围，存在通带；在 β_{LR} 是纯虚数的频率范围，则存在阻带。阻带是复合左右手传输线的突出特性，右手传输线和左手传输线是不存在阻带的。

根据式(1-1)、式(1-2)和式(1-3)可分别得到右手传输线、左手传输线和复合左右手传输线的色散曲线示意图，即 $\omega-\beta$ 图[16-17]，分别如图 1-4(a)(b)(c)所示。

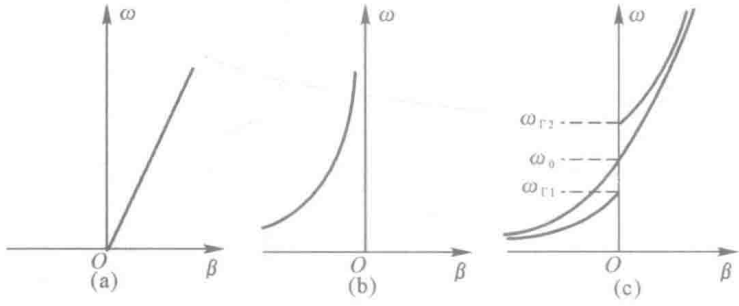


图 1-4　传输线的色散关系示意图

(a)右手传输线；(b)左手传输线；(c)复合左右手传输线

传输线的群速($v_{\mathrm{g}} = \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}\beta$)和相速($v_{\mathrm{p}} = \omega/\beta$)可由如图 1-4 所示的色散图得到：对于右手传输线来说，群速 v_{g} 和相速 v_{p} 相互平行($v_{\mathrm{g}}v_{\mathrm{p}} > 0$)；对于左手传输线，群速 v_{g} 和相速 v_{p} 反向平行($v_{\mathrm{g}}v_{\mathrm{p}} < 0$)；复合左右手传输线具有一个左手区域($v_{\mathrm{g}}v_{\mathrm{p}} < 0$)和一个右手区域($v_{\mathrm{g}}v_{\mathrm{p}} > 0$)。图 1-4(c)也表明，当 γ 是纯实数时，复合左右手传输线出现阻带。一般情况下，复合左右手传输线的串联谐振和并联谐振是不相等的，称之为非平衡条件；但当串联谐振与并联谐振相等时，即 $L'_{\mathrm{R}}C'_{\mathrm{L}} = L'_{\mathrm{L}}C'_{\mathrm{R}}$ ，在给定的频率上，左手部分的影响和右

手部分的影响平衡，称之为平衡条件[12]。平衡条件下，复合左右手传输线的相位常数可写为

$$\beta_{LR}=\beta_R+\beta_L=\omega\sqrt{L'_RC'_R}-\frac{1}{\omega\sqrt{L'_LC'_L}} \tag{1-5}$$

式中，复合左右手传输线的相位常数分成右手传输线相位常数 β_R 和左手传输线相位常数 β_L，表明此时复合左右手传输线中的左手部分和右手部分可单独分析和设计。因为相速依赖于频率，随着频率的增加，复合左右手传输线的色散也增加，这也说明复合左右手传输线具有双重特性，在低频段左手性占优，表现为左手传输线；在高频段右手性占优，表现为右手传输线。

平衡条件下复合左右手传输线的左手区域和右手区域的过渡出现在

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt[4]{L'_RC'_RL'_LC'_L}}=\frac{1}{\sqrt{L'_RC'_L}} \tag{1-6}$$

式中，ω_0 称为过渡频率。对于平衡条件，复合左右手传输线的左手区域到右手区域为无缝过渡，其色散曲线没有阻带。虽然在 ω_0 处相位常数 β_{LR} 为零，相当于有无限的导波波长（$\lambda_g=2\pi/|\beta_{LR}|$），但群速 v_g 为非零量，能量的传播依然存在。此外，长度为 d 的复合左右手传输线的相移在 ω_0 处为零（$\varphi=-\beta_{LR}d=0$），在左手频率范围（$\omega<\omega_0$），相位超前（$\varphi>0$）；在右手频率范围（$\omega>\omega_0$），相位滞后（$\varphi<0$）[12]。

均匀的复合左右手传输线结构在自然界并不存在，但在一定频率范围内，若导波波长比结构的不连续大得多时，可认为传输线是均匀的。如通过周期形式的级联 $L-C$ 单元，可以构建长度为 d 的均匀复合左右手传输线，需要注意的是复合左右手传输线的实现并非一定要求周期性，选用周期结构只是为了计算和制作方便。

1.2　复合左右手传输线在天馈线系统中的应用研究现状

由 1.1 节的分析可知，复合左右手传输线独特的色散关系使其具有右手传输线所不具备的特性，如双/多频、宽带移相、小型化及零/负阶谐振特性等，因此，很多传统微波元器件可采用复合左右手传输线来设计，使原有性能得到改善，更好地满足电路指标要求。本节对典型的复合左右手传输线结构及其在天线单元、馈线系统和天线阵列中的应用进行系统总结，对复合左右手传输线在天馈线系统中的应用研究具有重要的参考价值。

自然界不存在复合左右手传输线，它的实现需要人为设计，主要有两种实

现方式：一种是利用表面贴装技术(Surface Mount Technology，SMT)的集总参数元件来实现[18]；另一种是利用集成传输线的分布参数效应来实现，分布参数效应的复合左右手传输线最常见的有两种实现方式，一是利用交指缝隙和短路支节实现[6,19]，典型结构如图 1-5 所示，二是采用逆开环谐振器及其变形结构结合微带缝隙实现[20-24]，典型结构如图 1-6 所示。集总参数的表面贴装技术片式元件可直接利用，可容易、快捷地实现复合左右手传输线，但表面贴装技术片式元件只存在离散值，且由于自身谐振的原因不能用于高频，这样基于表面贴装技术片式元件的复合左右手传输线只能工作于较低频段；分布参数的复合左右手传输线因结构简单、易于实现且能工作于较高频段而具有更大的应用潜力。虽然分布参数元件可以工作在任意频率上，但在低频时会占用较大的尺寸，不利于小型化和降低成本。因此，表面贴装技术片式元件和分布式元件可以优势互补，在低频时一般选用表面贴装技术片式元件，在高频时一般选用分布式元件。

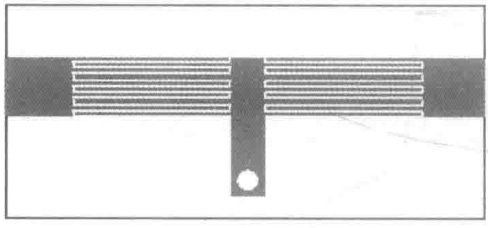


图 1-5　交指缝隙和短路支节实现方式

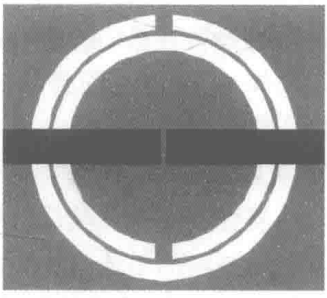


图 1-6　逆开环谐振器和微带间隙实现方式

文献[25]提出了一种小型化超宽带复合左右手传输线结构，在传统的基于交指缝隙和接地过孔的复合左右手传输线基础上，将交指缝隙的两边分别添加一个接地短截线，形成了一种对称的 π 形复合左右手传输线结构，如图 1-7所示，该结构具有超宽带特性；文献[26]提出了一种基于 Minkowski 分形互补型开环谐振器的电小平衡复合左右手传输线，如图 1-8 所示，与基于传统互补开环谐振器的复合左右手传输线相比，该结构通带带宽明显展宽，相对带宽达到 113.7%；文献[27]提出了一种基于共面波导的新型超宽带复合左右手传输线，根据 Bloch 周期电路理论，由单元集总等效电路模型，推导出左、右手频率范围和相应的相速、衰减特性，提取了传输线的等效本构参数，新结构左、右手参数独立可调，设计、调整方便，相比常见的交指或缝隙耦合，面面耦合形成的串联电容可有效抑制高频谐振，拓宽传输线通带；文献[28]提出

了基于开口环结构的复合左右手共面波导传输线，将开口环对称地制备在介质板背面且正对共面波导缝隙处，连接共面波导中心信号线和地板的细金属线正对开环谐振器(Split Ring Resonator，SRR)的中心区域，如图 1－9 所示；文献[29]利用表面贴装技术片式元件实现了基于共面波导的复合左右手传输线，如图 1－10 所示。

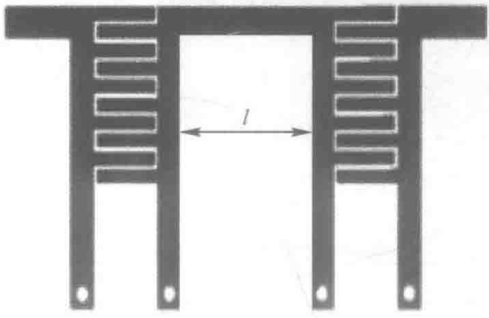
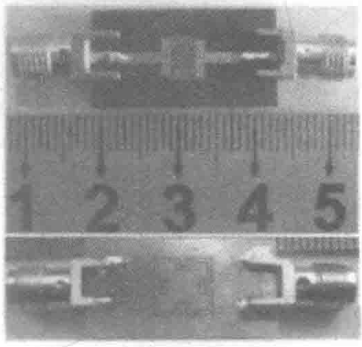


图 1－7　文献[25]报道的复合左右手传输线



1－8　文献[26]报道的复合左右手传输线

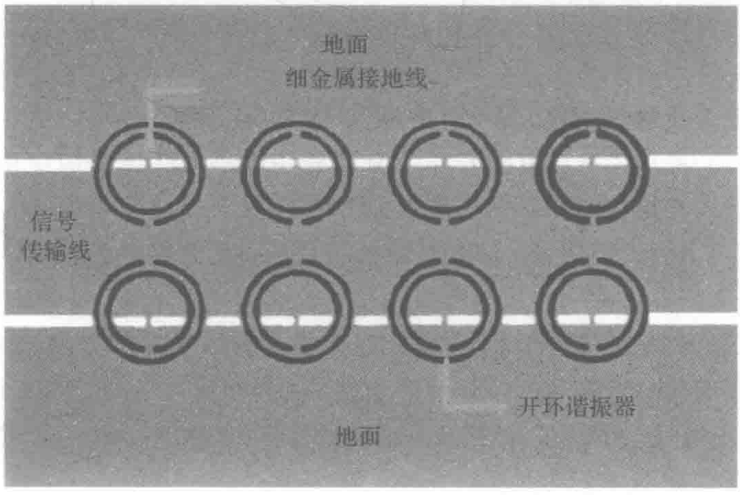


图 1－9　文献[28]报道的复合左右手传输线

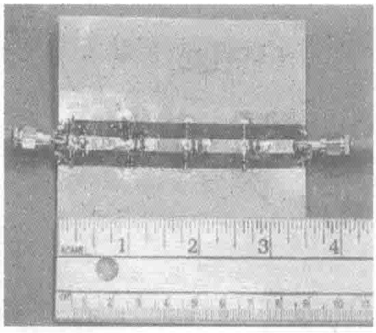


图 1-10　文献[29]报道的复合左右手传输线

1.2.1　复合左右手传输线在天线单元中的应用现状

针对复合左右手传输线的双/多频特性、宽带移相特性、小型化特性及零/负阶谐振特性，本节对复合左右手传输线及“块状”左手材料在小型天线单元、双/多频天线单元、宽频天线单元和高增益天线单元中的应用进行总结。

1. 小型天线单元

传统的天线小型化方法主要有短路加载、选用高介电常数基板、开槽开缝及利用集总元件等。但是，这些方法一般会牺牲天线的增益、效率和带宽等性能。基于复合左右手传输线的小型化特性，可利用复合左右手结构的相位补偿作用实现天线的小型化。

文献[30]提出了基于复合左右手介质的一维小型化谐振腔结构，即将左手介质的后向波效应与右手介质的前向波效应相结合设计出小于 $\lambda_0/2$ 的谐振腔，将其应用到天线中可突破传统微带天线 $\lambda_0/2$ 电尺寸的限制，实现天线的小型化；文献[31]利用左手材料制作了双夹板谐振腔天线，将腔体厚度减少到了 $\lambda_0/2$ 以下，设计了小型化天线，并且天线具有很好的方向性；文献[32]提出了基于左手材料谐振腔的超小型高指向天线，这种人工磁导体由两个法布里-珀罗谐振腔反射器构成，这种谐振腔的厚度可达到 $\lambda_0/60$ 的数量级；文献[33]通过在介质基板上排列周期平板金属结构，实现了左手特性，采用这种结构设计了小型的亚波长谐振腔天线，谐振腔的厚度同样可以达到 $\lambda_0/60$；文献[34]采用交指型复合左右手传输线设计了工作于 L 波段的小型微带天线，如图 1-11 所示，与相同频率的传统矩形微带天线相比，设计的复合左右手微带天线的尺寸减小了 51%，而增益特性没有明显的变化；由于零阶谐振频率和物理长度无关，理论上其物理长度可以任意小，文献[35]利用复合左右手传输线的零阶谐振特性设计了小型微带天线，如图 1-12 所示。

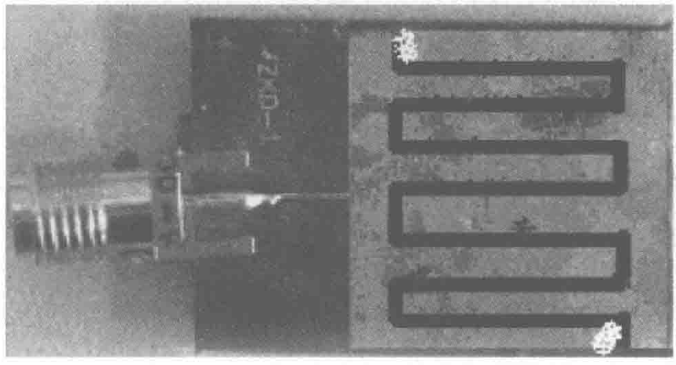


图 1-11　文献[34]报道的小型天线

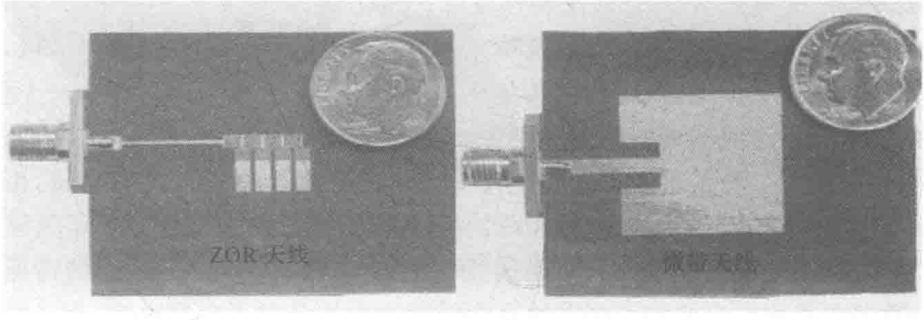


图 1-12　文献[35]报道的小型天线

2. 双/多频天线单元

双/多频天线单元的出现满足了人们对现代无线通信功能多样化的需求，实现双/多频的传统方法主要有利用双馈线和改变贴片天线形状等。这些方法一般具有辐射方向图相异和辐射效率较低等缺点，且尺寸较大。由于复合左右手传输线具有正阶、零阶和负阶谐振频率，因而可实现双/多频天线。

文献[36]基于复合左右手传输线提出了一种由低频带和高频带零阶谐振天线构成的双频零阶谐振天线，谐振频率分别位于 0.86 GHz 和 1.8 GHz，辐射效率的测量结果分别为 53%和 41%，并实现了全向辐射，其缺点是带宽较窄；文献[37]基于复合左右手传输线结构通过在基板两侧刻蚀平板图案设计了双频天线，该结构不需要添加过孔和集总元件就可很容易地实现微带线的激励，所设计的双频带天线可实现 0.373 GHz 的负阶频率和 0.817 GHz 的正阶谐振，并且具有全向辐射特性和小型化特性；文献[38]采用交指电容和并联电感构成的复合左右手传输线设计了双频圆极化环形天线，两个频带具有相似的辐射方向图，且具有很好的轴向辐射特性，工作频率分别为 1.768～