

一种基于复合左右手传输线结构的分形微带贴片天线

许河秀 王光明 高向军

(25#信箱, 陕西三原 713800)

摘要: 基于复合左右手传输线(CRLH-TLs)结构, 综合应用 Koch 分形曲线技术, 提出了一种新型分形左手矩形微带贴片天线。本文矩形贴片尺寸为 $18*18\text{mm}^2$, 仿真结果表明: 天线在零阶电磁波工作模式下尺寸缩减了 71%, 该工作模式下具有类似单极子天线全向辐射特性, 天线增益达到了 7.25dB, 是传统微带贴片天线的 2 倍。

关键词: 复合左右手传输线(CRLH-TLs), Koch 分形技术, 天线尺寸, 零阶谐振, 全向辐射

Study and Design of A New Kind of Microstrip Patch Antenna Based on Composite Right/Left-Handed Transmission Lines(CRLH-TLs) Combined With Fractal Geometry

Xu He-Xiu Wang Guang-Ming Gao Xiang-Jun

(25th post box, Sanyuan of shanxi 713800)

Abstract: A new kind of microstrip patch antenna based on Composite Right/Left-Handed Transmission Lines(CRLH-TLs) combined with Koch-fractal-shape geometry is designed in this paper .The dimension of the implemented antenna is $18\text{mm}*18\text{mm}$.Numerical results show that dimension has been miniaturized by 71%. The gain of the designed antenna is 7.25 dB which is two times as conventional microstrip patch antenna. Also, zeroth-order resonance (ZOR) antennas radiate electromagnetic wave like monopole antennas and simultaneously maintain the inherent advantage of low profile.

Keywords: Composite Right/Left-Handed Transmission Lines(CRLH-TLs), Koch-fractal-shape geometry, dimension of antenna, zeroth-order resonator (ZOR), omnidirectional radiation

1 引言

左手介质(left-handed medium)是 20 世纪 90 年代末期出现的一种新型周期结构的人工电磁媒质, 它同时具有负值的介电常数和负值磁导率。导致该媒质中传播的电磁波的电场 E、磁场 H 以及波矢量 k 三者构成左手关系, 故而得名。目前实现左手材料已有多种方法, 其中平面复合左右手传输线结构在微波电路及元器件设计中展现出巨大的潜力。该结构由加拿大多伦多大学的 Eleftheriades 领

导的研究小组和美国加州大学洛杉矶分校的 Itoh 教授领导的研究小组分别提出。Itoh 教授利用微带元件(交指电容和带状电感)实现的左手材料^[1], 即采用分布参数来实现传输线的左手传输特性。而 Eleftheriades 领导的研究小组在传输线中周期地加载集总电容、电感元件来实现传输线的左手传输特性^[2], 目前针对这两种传输线结构在微波电路设计中的应用研究已取得大量的成果, 很多以前较难实现的特性如微波元件的多频化、小型化、宽频带、低损耗等通过采用平面复合左右手传输线结构可以比较容易地实现。

传统微带天线虽然拥有体积小、重量轻、剖面低, 易与飞行器共形, 易于加工, 易与有源器件和

基金项目: 国家自然科学基金(50632030, 60871027)

电路集成等诸多优点，但还是很难满足现代通信应用对天线小尺寸的要求，分形几何结构由于具有空间填充性和自相似性所有具有能缩小尺寸，带来多频带等特性。但不可避免会减小天线的增益。本文基于复合左右手传输线理论，设计了加载并联电感工作于 S 波段的复合左右手微带天线，其工作特性由微带线本身的并联电路决定，即天线尺寸不依赖于工作波长^[3]。从而可以减小天线尺寸，弥补因分形带来的低增益问题。

2 天线结构与原理

通过在传统微带矩形贴片天线上加载复合左右手传输线单元（并联电感加载），并在此基础上进行 Koch 分形，天线结构模型，及简易等效电路模型分别如图 1 (a), (b) 所示。从图 1 中可以看出，天线单元由 Koch 分形曲线和接地金属化过孔组成。其中接地金属化过孔可以用并联电感 L_L 来等效，提供左手电感，其大小主要由接地金属化过孔的直径决定。右手电容与右手电感是由寄生效应引起的，Koch 分形曲线对左手特性的形成没有影响，主要在于 Koch 分形曲线可以延长电流的波程从而达到减小尺寸的目的。参数 L_L 、 C_R 、 L_R 的求解方法详见参考文献^[4]。通过调整单元模型各部分的尺寸就可以得到设计所要求的 L_L 、 C_R 、 L_R 。

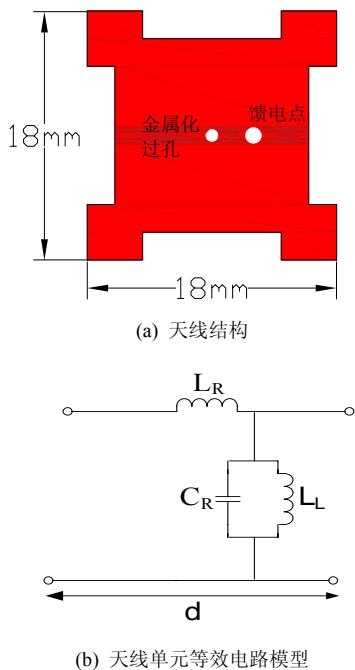


图 1 分形左手微带贴片天线

我们通过图 1(b)所示的等效电路图来分析 CRLH 传输线，这里假定 CRLH 传输线是理想的。等效电路模型包括串联的电感 L_R 和一个并联电感 L_L 以及与之并联的电容 C_R 。根据该电路模型结合电路相关知识可以直接写出串联枝节的阻抗，并联枝节导纳分别为

$$Z = j\omega L_R \quad (1)$$

$$Y = j(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L}) \quad (2)$$

由此得出传输线的传播常数 γ

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{ZY} \quad (3)$$

只考虑理想情况，所以 $\alpha=0$ 。又因为复合左右手传输线是一种周期排列介质，且当传输线的物理长度等于负阶、零阶及正阶的模式数乘以半波长时，即

$$l = \frac{n\lambda_g}{2} = NP \quad (4)$$

($n = -(N-1), -(N-2), \dots, -2, -1, CRLH-0, 1, 2, \dots, (N-1)$)

TL_s 将发生谐振，式中 n 为对应的阶数模式， P 为单元的长度， N 为 CRLH 传输线单元的个数， l 为 CRLH 传输线的物理长度。由此推得基于并联电感加载的 CRLH 传输线的色散关系为

$$\beta_n(\omega)P = \frac{n\pi P}{l} = \frac{n\pi}{N} = \cos^{-1}(1 - \frac{1}{2}(\omega^2 C_R L_R - \frac{L_R}{L_L})) \quad (5)$$

式中的相位常数 β 可以是纯实数或纯虚数，取决于被开方数是正数还是负数。在 β 是纯实数的频率范围内，存在通带；相反在 β 是纯虚数的频率范围内，则存在阻带。阻带是 CRLH 传输线的突出特性，对理想的右手传输线来讲是不存在的。图 2 给出了传统典型 CRLH-TL_s 单元的色散关系曲线。基于并联电感加载的复合左右手传输线由于缺少串联电容 C_L ，也就不能形成左手通带的截止频率

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}} = Freq_{r-0} \quad (6)$$

也即只存在零阶或者正阶工作模式。所以一个由 N 个单元，单元长度为 P 的微带线组成的基于并联电感加载的微带线会出现 $N-1$ 个工作模式，将 $n=0$ 代入式(5)得传输线的零阶谐振角频率

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}} = Freq_{r+0} \quad (7)$$

由式(7)可知微带线零阶工作模式的谐振频率只取决于微带线本身的并联特性，与其物理长度无

关。这也是本文引入复合左右手结构在微带天线设计中的主要原因。将 $n=1, 2, \dots, (N-1)$ 代入式(5)依次可得相应阶工作模式的谐振频率。因此对于基于并联电感加载的单元 CRLH 传输线只存在零阶工作模式和传统的普通微带半波长谐振模式，天线单元零阶谐振频率与物理长度无关，只与微带线本身的并联电路特性有关。

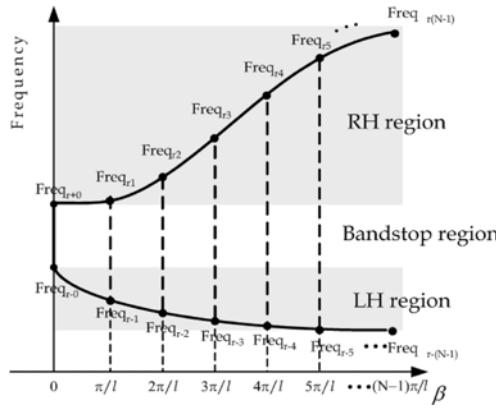
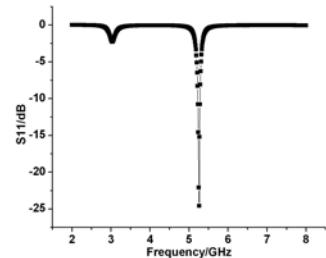


图 2 传统 CRLH-TL 的色散曲线

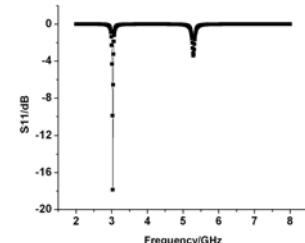
3 天线结果与分析

微带天线基板选择 Rogers 公司的 RT/duroid 5880，介电常数为 2.2，厚度为 0.5mm，微带矩形贴片尺寸见图 1 (a)，天线过孔直径为 1mm。利用 Ansoft HFSS 11 对此种结构的微带天线进行了全波仿真，馈电方式采用同轴线馈电。分别仿真了不同馈电位置 $L=3.5\text{mm}$ 、 4.5mm 时的天线性能， L 为 x 轴上距离原点的距离，得到天线零阶工作模式的频率为 3.05GHz ，普通微带半波长谐振模式的工作频率为 5.26GHz 。图 3 分别给出了 $L=3\text{mm}$ 、 4.5mm 时贴片天线的回波损耗曲线。由该图可知天线有两个谐振模式，选择不同的馈电点进行馈电影响了天线输入阻抗从而能抑制某些模式的传播。由前面的理论分析可知对于基于并联电感加载单元微带天线只存在零阶工作模式和普通微带贴片半波长谐振模式，从而说明仿真结果与前面的分析完全吻合，验证了设计的正确性。当

$L=3\text{mm}$ 时，零阶工作模式电磁波的回波损耗为 -2.3dB ，普通微带半波长谐振模式电磁波的回波损耗为 -24.6dB 。天线只能很好的工作于普通微带谐振模式。当 $L=4.5\text{mm}$ 时零阶工作模式电磁波的回波损耗为 -17.8dB ，而普通微带模式为 -3.4dB ，天下只能很好的工作于零阶模式。



(a) $L=3\text{mm}$



(b) $L=4.5\text{mm}$

图 3 $L=3\text{mm}$ 、 4.5mm 时天线的回波损耗曲线

图 4 给出了天线零阶电磁波工作模式 3.05GHz 时的贴片电流分布，由该图可以看出电流在贴片表面呈均匀全向分布，与普通微带天线半波长谐振模式电流分布完全不同。零阶谐振天线能等效为一电偶极子，在与贴片垂直的面内能激起同相的电场。不同于传统微带天线激励起的正弦分布电场，从而可以获得比传统微带天线更高的增益。

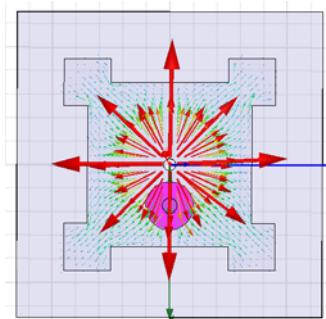


图 4 $f=3.05\text{GHz}$ 时的贴片表面电流分布

在相同介质板材的条件下，仿真得到传统微带贴片天线谐振在 3.05GHz 时的贴片尺寸 $32.9*32.9\text{mm}^2$ ，而本文天线尺寸为 $18*18\text{mm}^2$ ，天线有效缩减幅度达到 71%。图 5 给出了 $L=4.5\text{mm}$ 时普通微带谐振模式 5.26GHz 时的天线增益图，天线增益达到 7.25dBi ，是普通微带天线的 2 倍，说明复合左右手微带天线在零阶工作模式占优的情况下能提高天线增益也即能提高天线辐射效率，有效验证了本文分形左手结构设计的有效性。

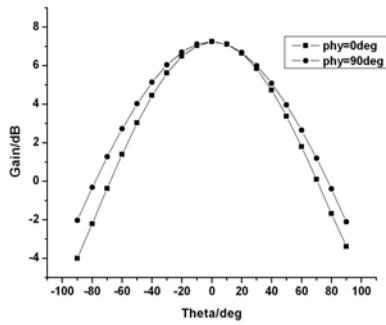


图 5 $L=4.5\text{mm}, f=5.26\text{GHz}$ 时的天线增益

图 6 给出了零阶电磁波工作模式频率 3.05GHz 下的天线辐射方向图, 从其结果可以看出天线在零阶电磁波工作模式下类似于单极子天线的全向辐射模式(x - y 面内), 在近距离无线通信等场合有着良好的应用前景。

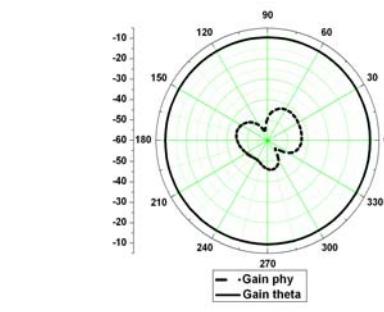
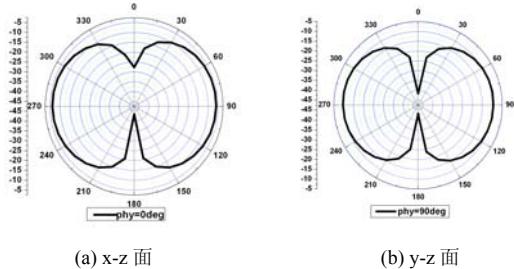


图 6 天线零阶电磁波工作模式下的辐射方向图

4 结论

本文从复合左右手微带线的理论出发, 综合分形技术, 构造了一种分形左手结构的微带天线。与传统的微带天线设计相比, 天线具有零阶谐振模式, 天线尺寸减小 71%, 零阶谐振时普通微带谐振模式天线增益很高。仿真结果表明, 这种基于分形左手结构的零阶电磁波模式类似于单极子天线的全向辐射模式。通过调整馈线的长度及位置, 可以实现天线的单频或者是多频工作。

参 考 文 献

- [1] Caloz c, Itoh T. Application of the transmission line theory of left-handed materials to the realization of a microstrip " LH line ". IEEE AP-S Int Symp Dig,2002.412~415
- [2] George V Eleftheriades, Ashwin K Iyer,Peter C Kremer. Planer negative refractive index media using periodically L-C Loaded transmission lines. IEEE Trans Micro TheoTech,2004,50(12):2702~2712
- [3] 安涛, 张晓鹏.应用于 L 波段的新型左右手复合微带天线[J].现代雷达, 2009, 31(4):70-72
- [4] Zhang Zhongxiang, Xu Shanjia. A Novel balun structure with a composite right-left-handed transmission line. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 45(5):422~424

作者简介:

许河秀, 男, 博士, 主要研究方向为天线、微波毫米波电路;

王光明, 男, 教授、博士生导师, 主要研究方向天线、微波毫米波电路;

高向军, 男, 博士, 主要研究方向为天线。

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>