

基于复合左右手传输线的天线小型化研究

冯理, 曹卫平, 田国涛

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要:利用周期加载串联电容和并联电感的左右手传输线结构设计了四元小型平面偶极子天线,它具有随着频率降低波长也会减小的独特性质,对天线进行了仿真和测试,短偶极子天线工作于 $n=-1$ (484 MHz), $|S_{11}|<-10$ dB相对带宽是2%,在自由空间的长度是0.19波长,仿真增益为2.2 dBi。同时对多元左手偶极子也进行研究,结果表明,这类结构的天线能在短波超短波段实现小型化。

关键词:复合左/右手传输线; 偶极子天线; 左手材料; 加载天线; 周期结构

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-808X(2009)06-0455-04

Applying composite right/left handed Transmission Line to miniature and broadband antenna

FENG Li, CAO Wei-ping, TIAN Guo-tao

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A novel planar four unit cells dipole antennas based on composite right/left handed transmission line and loaded periodically with shunt inductors and series capacitors was constructed in this study, which features reduced wavelength with decreasing frequency of antenna. The simulated and measured results showed that short dipole antenna working at $n=-1$ (484 MHz) based on conventional resonance numbering. The dipole antenna of 0.19 wavelengths in free space had a gain of 2.2 dBi and bandwidth of 2% for $|S_{11}| < -10$ dB. Left-handed dipole antennas with many unit cells was also researched. The results indicates that antenna composed of a composite right/left handed transmission line could achieve miniaturization in shortwave and ultrashortwave.

Key words: composite right/left handed Transmission Line; dipole antennas; left-handed metamaterial; loaded antennas; periodic structures

随着科学技术的发展,各种电子设备都在朝着小型化与微型化方向研制,这使得天线往往成为系统中最笨重的部件而显露出来,因此与小型化设备相适应的各种小型天线的研制急不可待。天线是与自由空间相耦合的部件,它的性能与自由空间的工作波长密切相关,理论上,天线的工作频率越低,波长越长,天线长度也必须相应地增加,如果天线尺寸的减小,必然导致天线性能在增益、带宽等方面恶化,最终使弱信号区的接收效果变差。目前实现天线小型化主要方法是通过改变天线的外形结构、通过加载技术、通过添加外部匹配网络等有效地改善小天线的电属性,而且在很多情况下是适当牺牲天线的在增益、效率方面的

性能指标来获得较小的尺寸。由于天线是由传输线演变而来,复合左右手传输线自然也会应用到天线的设计,通过左右手传输线结构,天线在低频时和高频时的电流幅度分布一致,在过渡频率时天线上的电流波波长无限大,相位常数为零,从而实现在天线物理尺寸不变下降低谐振频率,更易阻抗匹配和提高辐射效率,改变方向图,实现在小型化的基础上满足其辐射特性^[1]。

1 基于复合左右手传输线的天线理论

复合左/右手传输线是这样一类传输线^[3]:当电磁波在该传输线中传播时,在某个频率范围内其传播

收稿日期: 2009-09-21

基金项目: 广西研究生科研创新项目(2009105950809M15)

作者简介: 冯理(1983—),男(瑶),广西贵港人,硕士研究生,主要研究方向为天线理论和设计。E-mail:155317201@qq.com

特性显现“左手特性”——等效介电常数和等效磁导率同时为负值,电场、磁场、波矢量遵从左手定则;而在其他频率范围内呈现“右手特性”——等效介电常数和等效磁导率同时为正值,电场、磁场、波矢量遵从右手定则。图1是左右手传输线等效单元电路模型。

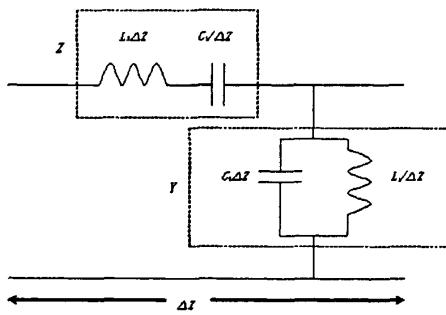


图1 左右手等效单元电路模型

由传输线理论,图1所示理想无耗复合左右手传输线的传输常数可以表示为

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{ZY} , \quad (1)$$

式中: $Z = j(\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L})$, $Y = j(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L})$ 。 (2)

无耗复合左右手传输线的色散关系是

$$\beta(\omega) = s(\omega) \sqrt{\omega^2 L_R C_R + \frac{1}{\omega^2 L_L C_L}} - \left(\frac{L_R}{L_L} + \frac{C_R}{C_L} \right) \quad (3)$$

$$s(\omega) = \begin{cases} -1, & \omega < \omega_{r_1} = \min\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \\ +1, & \omega > \omega_{r_2} = \max\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,如果 $C_L=L_L=0$,则复合左右手传输线变为纯右手传输线;如 $C_R=L_R=0$,则复合左右手传输线变为纯左手传输线^[2]。

当 $L_R C_L = L_L C_R$,复合左右手传输线处于平衡情况,不存在非平衡情况下的“禁带”,其特征阻抗成为一个与频率无关的变量,即

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (5)$$

传输常数简化为

$$\beta = \omega \sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} . \quad (6)$$

理想复合左右手传输线在自然界中不存在,可以通过梯形网络电路结构来实现等效均匀的左右手传输线。当单元长 $a \rightarrow 0$, N 个LC单元模型的级联等价

于长度为 $L=Na$ 的理想复合左右手传输线。实际上只要满足条件 $a < \lambda_g/4$ 即可, λ_g 是波导波长^[3]。

根据Bloch-Floquet周期条件,左手单元组成的无限长传输线的相位常数 β 表示如下^[4]

$$\beta = \frac{1}{a} \cos^{-1} \times \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\omega^2 L_L C_L} + \omega^2 L_R C_R - \left(\frac{L_R}{L_L} + \frac{C_R}{C_L} \right) \right] \right\} . \quad (7)$$

应用泰勒近似 $\cos(\beta p) \approx 1 - (\beta p)^2/2$,式(7)可变为式(3), ω 为角频率, C_R 与 L_R 分别是长度为 a 的平行金属线的固有电容和电感,金属线半径 r ,两线距离 d 和单元长度 a 的函数。在仿真过程中,当单元结构其它参数确定,可通过合适选取左手加载 C_L 与 L_L 值,使传输线满足平衡条件。

为方便设计天线,采用集中并联电感和串联电容周期加载金属导线的阶梯网络结构实现左右手传输线,用这种左右手传输线构造新型左手天线,天线谐振模数 n ,天线长度 L 和天线上驻波波长 λ 关系为

$$L = |n| \frac{\lambda_a}{2} . \quad (8)$$

在低频左手特性范围, n 为负整数,并且随着频率降低而减小。左手加载天线的谐振是由天线长度 L 和电容、电感所控制的感生电流的波长 λ 共同决定的。而右手天线的谐振是由长度 L 和自由空间波长 λ_0 所决定^[4-5]。

天线上不同谐振模数 n 时的频率可以从 $\beta\alpha/\pi$,谐振模数 n 和单元数目 N 之间关系获得:

$$\frac{|\beta|\alpha}{\pi} = \frac{|n|}{N} , \quad (9)$$

$$\lambda_a = \frac{2\pi}{|\beta|} , \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{L}{N} . \quad (11)$$

由式(7),随着工作频率降低,相位常数 β 也降低,在左手区域是负值,再由式(10)知, β 绝对值上升,波长 λ_a 将会变短,这是天线在频率低端有 n 阶谐振点的根本原因。

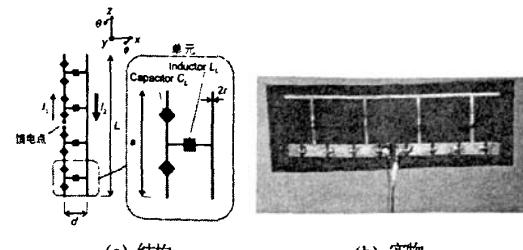


图2 左手四单元偶极子天线结构和实物

2 集总元件加载的左手周期结构小天线

为实现天线小型化,用左右手传输线构造了易于制作的平面左手加载四单元偶极子天线,如图2所示。天线由集总元件周期加载介质板上的敷铜线而成。电容 C_L 和电感 L_L 形成左手材料,它们的值影响天线谐振频率,电容 C_L 接在阶梯网络的一端,此端同时也有馈入点,这导致竖直线上电流的幅度差异,它们在天线远场将不会完全抵消,从而产生电磁波的辐射。天线两端是开路,并且其上有驻波存在,这与右手偶极子是类似的^[6-7]。

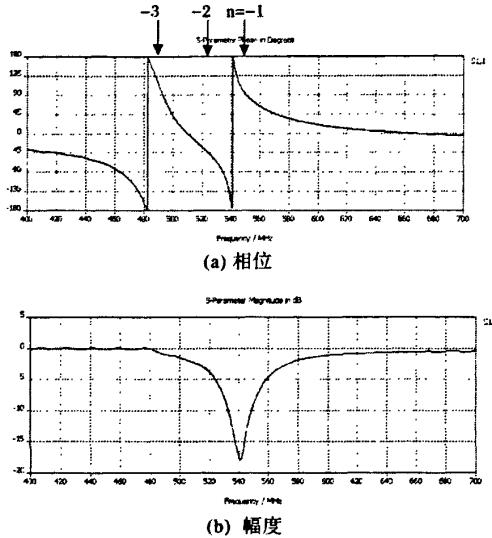


图3 仿真的天线回波损耗 S_{11} 的相位和幅度

用三维电磁场仿真软件CST2008对天线的尺寸和加载的集总元件值进行优化仿真,得到天线长 $L=120\text{ mm}$,单元长 $a=30\text{ mm}$,两线中心距离 $d=30\text{ mm}$,中心馈电点缝隙宽 $g=3\text{ mm}$,为了提高天线带宽,下边的铜皮带线较宽,宽 $w_{t1}=7\text{ mm}$,其余铜皮带线宽均为 $w_{t2}=1.4\text{ mm}$,介质板厚度 $h=1\text{ mm}$,介电常数为2.65。单元串联贴片电容值 $C_L=1.5\text{ pF}$,并联贴片电感值 $L_L=10\text{ nH}$,安装集总元件的缝隙宽 $m=2\text{ mm}$,仿真的天线谐振于 $n=-1(540\text{ MHz})$, $|S_{11}|<-10\text{ dB}$ 是16 MHz,相对带宽是3%,增益为2.2 dBi,带宽和增益满足工程应用。仿真的天线方向图如图4所示,由于天线纵向结构不对称,细铜线也参与辐射, E 面方向图近似8字型, H 面方向图也不是纯圆。

对比图3的(a)和(b),发现 $n=-1(540\text{ MHz})$ 谐振点可以同时在天线回波损耗 S_{11} 的幅度图和相位图中看到,在此谐振点上天线电流呈余弦分布,能达到阻抗匹配,这时天线输入阻抗的实部接近 50Ω ,天线

在谐振同时也和自由空间匹配,大部分能量辐射出去,增益和一般右手偶极子天线差不多,为2.2 dBi。但是,在回波损耗 S_{11} 的相位图中看到的是3个谐振点,因为另外两个谐振点 $n=-2(508\text{ MHz})$ 和 $-3(482\text{ MHz})$ 是不匹配模,所以在 S_{11} 的幅度图中没有出现。

根据仿真结果制作了天线实物,如图2(b),左手偶极子天线的中点直接受 50Ω 同轴线馈电,其内导体馈给偶极子的右半臂,而外导体馈给左半臂,同轴线另一端接SMA头,用Agilent N5230A矢量网络分析仪对天线端口的S参数进行了测试,测试结果稍微偏离仿真结果,天线中心谐振频率下降为484 MHz,如图5,这时长度是 $0.19\lambda_0$, $|S_{11}|<-10\text{ dB}$ 是10 MHz,相对阻抗带宽是2%。

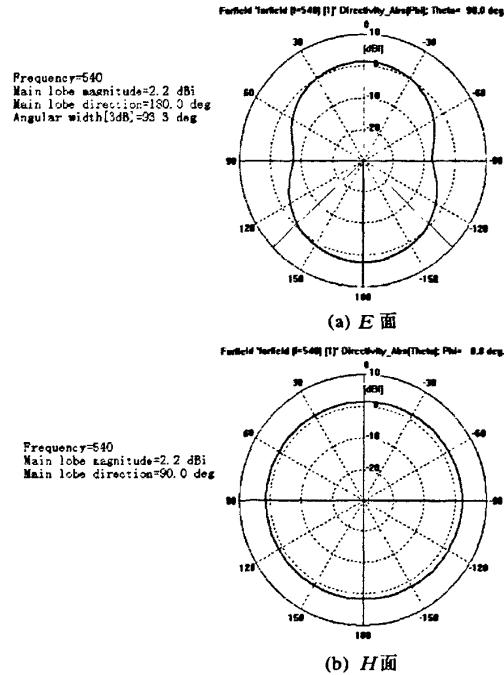


图4 仿真的左手四单元偶极子 E 面和 H 面方向图

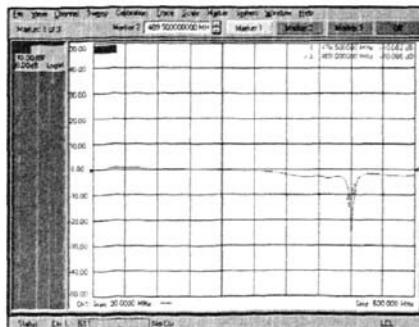


图5 左手四单元偶极子天线 S_{11} 测试结果

3 多元左手偶极子天线仿真

为实现谐振点更低的左手偶极子天线,可以在上面四单元左手偶极子基础上增加单元数目 N , N 为偶数。在 L_L 与 C_L 的比值不变下同时增大 L_L 和 C_L ,其它参数不用变化,当选取合适 C_L 和 L_L 值, N 元左手偶极子就会谐振于更低频率。经仿真发现, $N=6,8,10,12,14,16$ 的左手偶极子都谐振于 $n=-1$ 模式,回波损耗相位图都有 $N-1$ 个谐振点,天线在谐振点降低同时, $|S_{11}| < -10$ dB的绝对阻抗带宽也会减小,但相对阻抗带宽保持为3%,到 $N=16$ 时谐振于174 MHz,绝对带宽为5 MHz,增益为2 dBi,在自由空间的长度为 $0.28\lambda_0$,这时, $L_L=170$ nH, $C_L=25.5$ pF。

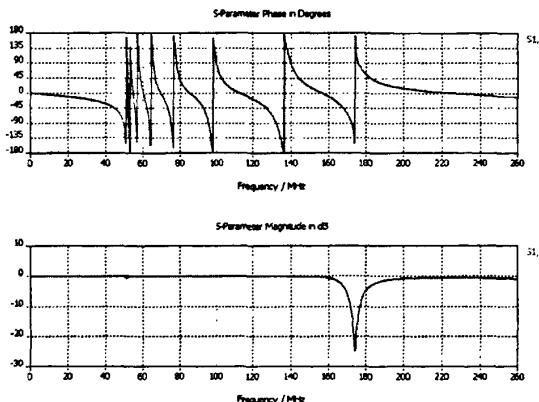


图6 仿真的16元左手偶极子 S_{11} 相位和幅度

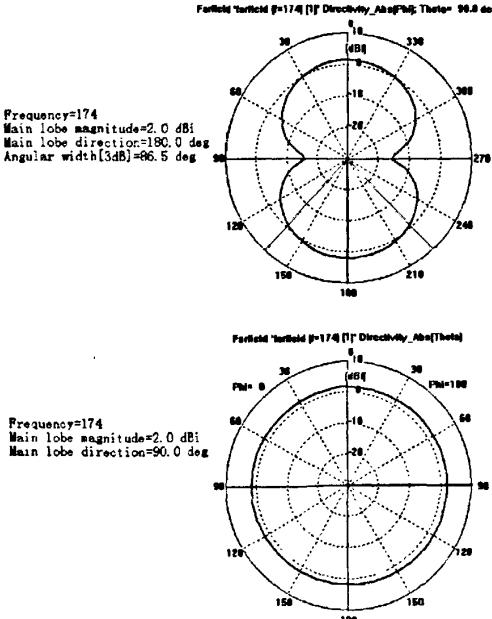


图7 仿真的左手十六单元偶极子E面和H面方向图

4 结论

在本文中,阐述了利用复合左右手传输线构成的小型天线能在频率低端谐振的基本原理,并设计了一款左手加载的四元平面偶极子天线,仿真和测试性能良好,发现左手偶极子和右手偶极子天线相比能在增益和物理长度不变下实现天线谐振点降低一半。多元左手偶极子也进行了仿真。这种左手偶极子可组成偶极子阵列天线,应用到小型基站天线设计。在左手偶极子组阵时要用到功分器馈电网络^[8],设计工作在484 MHz时的右手功分器尺寸较大,原因是一般右手1/4波长阻抗变换线较长,可以考虑用工作于左手特性范围的复合左右手传输线实现1/4波长阻抗变换,当复合左右手传输线在484 MHz附近的相位超前90度,就能达到1/4波长阻抗变换的效果。根据此原理,仿真设计了左手集总加载的一分四功分器,在尺寸减小一半情况下结果符合要求。

为实现带宽更高小型化天线,可考虑将集总加载的左手周期结构传输线概念应用到短波段行波天线设计。对基于复合左右手传输线原理设计的新型天线,还需不懈努力探索研究,相信将来会在天线技术领域发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] ALEJANDRO Lucas Borja, PETER S. HALL, QING Liu, et al. Omnidirectional Loop Antenna With Left-Handed Loading [J]. IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, 2007, 6: 495-498.
- [2] 徐善驾,朱旗.复合左右手传输线构成的异向介质及其应用[J].中国科学技术大学学报,2008(7):711-724.
- [3] 崔万照,马伟,等.电磁超介质及其应用[M].北京:国防工业出版社,2008:153-168.
- [4] IIZUKA H, and HALL, P S. Left handed dipole antennas and their implementations[J]. IEEE Trans Ant and Prop, 2007, 55 (5):1246-1253.
- [5] IIZUKA H, HALL, P S and LUCAS BORJA A. Dipole antenna with left handed loading [J]. IEEE Antenna, Propagation Wireless Letters, 2006, 5:483-485.
- [6] IIZUKA H, HALL P S, A left-handed dipole concept [J]. presented at the Int. Workshop Antenna Tech., New York, Mar, 2006:396-399.
- [7] HALL P S, LIU Q, Dipoles and loop Antennas with left handed loading [J]. IEEE. Loughborough Antennas & Propagation Conference, 2008:193-196.
- [8] 段文涛,魏宏亮,李思敏.低旁瓣十六元缝隙微带天线阵的设计[J].桂林电子科技大学,2007,27:441-444.

责任编辑 梁王欢

英文编辑 陆小明

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>