

文章编号:1001-9014(2005)05-0341-03

左手微带传输线在毫米波天线阵中的应用

张忠祥, 朱旗, 徐善驾

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027)

摘要:提出了一种新的左手微带传输线结构。基于这种结构,构建了左-右手混合式天线阵微带馈线,通过控制该馈线中左、右手传输线的长度,可以在特定长度传输线上获得零相位延迟。将此种传输线作为馈线应用到串联馈电的毫米波微带天线阵中。结果表明,利用此种传输线馈电和传统右手传输线馈电相比,可以避免由传统右手馈线在天线激励点之间引入的相位差,从而克服了固有的天线波束偏移。

关键词:左手传输线;左-右手混合传输线;毫米波天线;微带阵列

中图分类号:TN811+.7, TN822+.3 文献标识码:A

APPLICATION OF LEFT-HANDED MICROSTRIP TRANSMISSION LINE IN THE DESIGN FOR MILLIMETER WAVE MICROSTRIP ARRAY

ZHANG Zhong-Xiang, ZHU Qi, XU Shan-Jia

(Dept. of EEIS, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A novel left-handed microstrip transmission line (LH-TL) structure was presented. Based on this structure, feed lines with composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL) structure for microstrip arrays were also presented. By controlling the lengths of LH-TL and RH-TL parts in CRLH-TL, naught phase shifts of the transmission line can be obtained. As an application, the CRLH-TL has been used as feed line in series fed millimeter wave microstrip arrays. Numerical results show that, by means of the CRLH-TL, the insertion phase shifts at excited ports of microstrip elements can be eliminated. As a result, the inherent beam shifts disappear.

Key words: left-handed transmission line (LH-TL); composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL); millimeter-wave antenna; microstrip array

引言

和传统右手材料不同,左手材料同时具有负的介电常数和负的磁导率。早在1968年,Veselago就在理论上预示了左手材料在传输电磁能量时体现出一些奇异的现象,如反向多普勒频移和反向切伦科夫辐射等^[1]。由于自然界中至今没有发现天然的左手材料,所以目前还没能将左手材料运用到实际应用中。最近研究^[2]表明,可以利用对偶原理来等效地实现左手材料,其中最具有吸引力的是Itoh用微带线实现的左手材料特性^[2]。然而该文中为了得到够大的并联电感,其等效的左手传输线单元结构如图2(c)所示,具有很大的尺寸,从而在一定程度上

限制了它在微波和毫米波集成电路中的应用。

本文首先提出了一种新的微带传输线结构,它具有结构简单和紧凑的特性;其左手特性由它表现出的后向辐射和相位超前特征所证实。文中还进一步构建了左-右手混合传输线结构,并将其应用到串联馈电的毫米波微带天线阵列中。由于右手传输线和左手传输线分别具有相位延迟和超前特性,通过控制左-右手混合馈线中右手传输线和左手传输线的长度,可以获得零相位延迟,从而避免由天线单元馈电处非零相位延迟所导致的波束偏移。

1 左手微带传输线的实现

1.1 左手传输线

收稿日期:2004-11-20,修回日期:2005-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60171019 和 60371010)

作者简介:张忠祥(1976-),男,安徽合肥人,中国科学技术大学博士研究生,主要从事电磁场理论与微波技术和传输线结构的左手材料研究。

Received date: 2004-11-20, revised date: 2005-06-11

由图 1 所示的无耗左手传输线对偶等效电路^[2], 可以得到传输线的 ω - β 的关系式:

$$\beta(\omega) = -1/\omega\sqrt{L'C'} \quad , \quad (1)$$

根据定义, 如图 1 所示等效电路的左手传输线的相速度和群速度分别为:

$$v_p = -\omega^2 \sqrt{L'C'} \quad ,$$

$$v_g = +\omega^2 \sqrt{L'C'} \quad , \quad (2)$$

由式(2)可以看出由此单元构成的均匀传输线上传输的电磁波的群速度和相速度方向相反, 说明该传输线具有左手材料特性.

1.2 左手微带传输线的实现

为了克服^[2]中给出的左手单元结构面积过大的缺点, 本文提出如图 2(a)所示左手微带传输线的单元结构, 它利用交趾电容两个最外侧分支接地来作为两个并联电感, 使该结构具有结构简单和紧凑的特性, 从而单元尺寸和面积大大减小.

图 2(b)给出了由 9 个图 2(a)所示左手单元构成的微带传输线的 E 面模拟辐射方向图, 可以看出明显的左手材料所特有的后向辐射特征^[3]. 同时由于相速度和群速度反向的特性, 电磁波在左手材料中传播的时候, 沿着传播方向的电磁波的相位将超前. 表 1 给出了本文提出的左手微带结构的相位和单元数的关系, 通过表 1 可以看出随着左手微带传输线长度的增加即单元数的增加, 电磁波的相位不断的超前, 与传统的右手传输线的相位滞后相反.

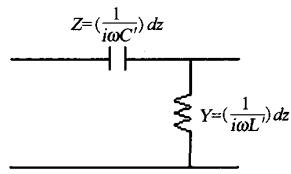


图 1 无耗左手传输线对偶等效电路的无限小单元模型

Fig. 1 Infinitesimal circuit model of the LH-TL as the dual of the conventional TL

表 1 左手微带单元数与对应的电磁波相位

Table 1 Numbers of the units of LH-TL and the phase of EM wave

微带单元数	电磁波相位
1	30.07°
2	64.49°
3	105.1°
4	145.5°
5	177.3°

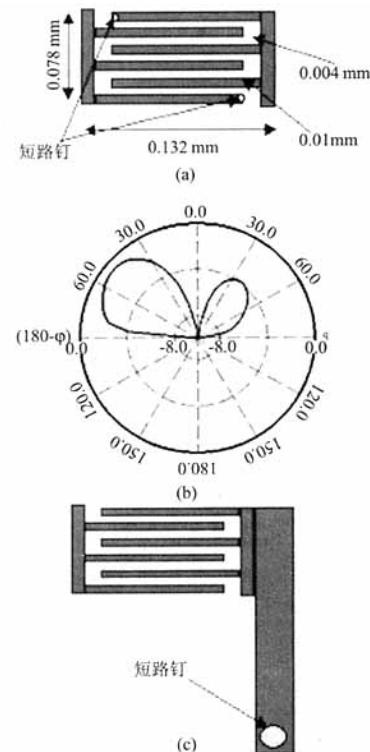


图 2 (a) 94GHz 左手微带传输线单元结构尺寸 (b) 模拟辐射方向图 (c) [2] 中提出结构示意图

Fig. 2 (a) The structure and dimension of unit circuit cell of LH-TL at 94GHz; (b) simulated radiation pattern (c) the unit structure presented in [2]

2 左-右手混合传输线在毫米波微带阵列的应用

在毫米波微带天线阵列中, 为了减少插入损耗和获得更高的辐射效率, 常常采用串联馈电替代并联馈电形式^[4-6]. 由于串联馈电结构存在着馈电点间的相位差, 使得辐射方向发生偏移. 为了克服这种偏移, 本文应用左-右手混合微带线替代传统的右手微带线, 来避免馈电点间的相位差和相应的辐射方向图的偏移.

文中以两个微带单元为例, 给出右手微带线馈电和左-右手混合微带线馈电微带阵列的比较. 图 3 给出了 94GHz 两个 H 型缝隙耦合毫米波微带天线单元阵列的结构, 馈电点间距 $d = 1\text{mm}$. 表 2 给出了图 3 结构中的参数值.

左-右手混合传输线是由左手传输线和右手传输线串接而成, 可以通过控制混合传输线中左手和右手传输线的长度比例, 以满足应用中对不同相位

差的需要。图4给出了图3中左-右手混合微带馈线的结构,长度为1mm。其中左手微带线由四个如图2(a)所示的左手单元组成,长度为0.528mm,相位超前145.5°;右手微带线长度为0.472mm,相位滞后145.5°,宽度为50欧姆微带线宽度0.078mm。

图5给出了左-右手混合线馈电天线阵的电压驻波比曲线,可以看出该天线阵的中心工作频率为94GHz,在1.5GHz频带内驻波比小于1.5。图6给出了右手微带馈电和左-右手混合微带线馈电的两种不同馈电方式的模拟结果的比较。通过图6可以看出采用新的左-右手混合微带线馈电,克服了传统右手馈电时由于馈电点的相位差而造成的天线阵列辐射方向图的偏移。

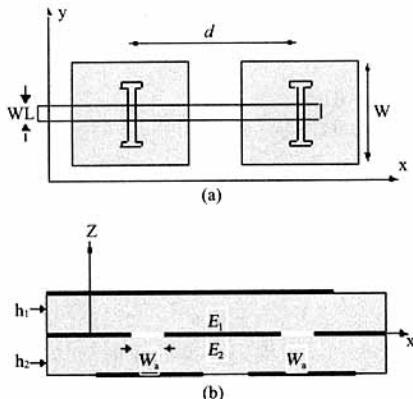


图3 94GHz两个H型缝隙耦合微带天线阵列结构图: (a) x-y坐标面 (b) x-z坐标面
Fig. 3 The structure of two units of aperture-coupled microstrip array antennas with H-slot at 94GHz: (a) x-y coordinate surface; (b) x-z coordinate surface

表2 微带天线阵列结构参数

Table 2 The parameters of the microstrip array antennas

参数	数值
h1	0.1mm
h2	0.2mm
W	0.74mm
Wa	0.05mm
WL	0.078mm
ε1	11.7
ε2	4.2
d	1mm

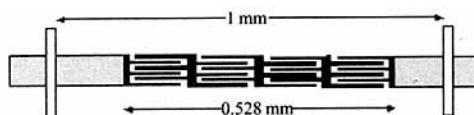


图4 包含4个左手单元的左-右手混合微带线
Fig. 4 CRLH-TL feeding line consisting of 4 LH-TL units

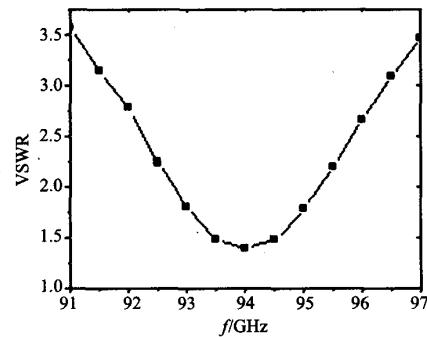


图5 左-右手混合线馈电微带阵列天线的电压驻波比曲线

Fig. 5 The VSWR property of the antenna array fed with CRLH-TL configuration

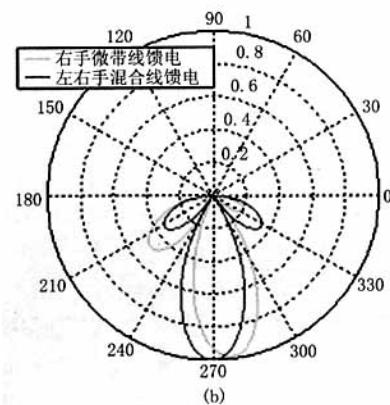
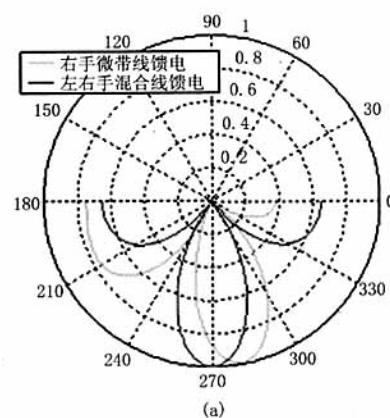


图6 左-右手混合作用与传统右手传输线串联馈电的94GHz毫米波微带阵列辐射方向图(dB)的比较:
(a) E面方向图 (b) H面方向图

Fig. 6 A comparison of radiation pattern (db) between millimeter-wave microstrip array with traditional series-fed and CRLH-TL-fed configuration at 94GHz: (a) E-plane (b) H-plane

(下转第347页)

表1 不同 M, L 值对应的理论测速精度、最大不模糊测速范围表Table 1 Academic velocity precision and maximum discriminable velocity vs M, L

M	256	256	512	512	1024	1024
L	23	35	12	18	6	10
Δv_t (m/s)	1.04	0.67	1.04	0.67	1.14	0.64
v_{range} (m/s)	[-133.2, 133.2]	[-86.2, 86.2]	[-266.3, 266.3]	[-172.3, 172.3]	[-585.9, 585.9]	[-325.5, 325.5]

通过仿真实验证明了这种方法的可行性、快速性。利用本文提出的方法进行运动补偿所得的目标一维距离像可以进一步应用于毫米波 Costas 编码雷达的目标识别技术中。

REFERENCES

- [1] SUN Chang-Gui, LI Xing-Guo. Two-step stretch processing method for MMW high-resolution radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙长贵, 李兴国. 毫米波高分辨率雷达二步伸缩处理方法. 红外与毫米波学报), 2003, 22(6): 457—460.
- [2] ZENG Yong-Hu, WANG Xue-Song, XIAO Shun-Ping, et al. High-resolution radar target recognition based on correlation of instantaneous polarization WVD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (曾勇虎, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于瞬态极 WVD 相关的高分辨率雷达目标识别. 红外与毫米波学报), 2004, 23(6): 455—458.
- [3] LIU Jing, LI Xing-Guo, Wu Wen. Application of waveform entropy method for motion compensation of MMW Costas

(上接第 343 页)

3 结论

本文提出了一种新型微带左手传输线结构, 并证明了它具有左手材料的后向辐射和相位超前的特征。由于该结构简单紧凑, 所以它特别适用于微波集成电路和毫米波集成电路。文中给出了一个左-右手混合微带线在毫米波微带阵列中应用的例子, 利用左手传输线相位超前的特性, 控制阵列馈电点间的零相位差, 来克服辐射方向图的偏移。

REFERENCES

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 4: 509—514.
- [2] Christophe Caloz, Itoh T. Application of the transmission

frequency hopped radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘静, 李兴国, 吴文. 波形熵法在毫米波 Costas 跳频雷达运动补偿中的应用. 红外与毫米波学报), 2003, 22(4): 303—306.

- [4] LIU Zheng, ZHANG Shou-Hong. Estimation of target motion parameter in a stepped-frequency pulses radar [J]. *Acta electronica sinica* (刘峥, 张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计. 电子学报), 2003, 28(3): 43—45.
- [5] MU Shan-Xiang, LI Xing-Guo, KONG De-Chun. Doppler performance analysis of interpulse Costas FH radar signal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牟善祥, 李兴国, 孔德春. 脉间 Costas FH 雷达信号的多普勒性能分析. 红外与毫米波学报), 2000, 19(4): 313—317.
- [6] Wehner D R. High resolution radar [M]. London: Artech House Inc, 1997.
- [7] Jiang Nan-Zhi, Wang Mao-Lu, Li Shao-Hong, et al. Compensation methods for stepped frequency radar HRR imaging [J]. *Journal of Electronics* (蒋楠稚, 王毛路, 李少洪等. 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析, 电子科学学刊), 1999, 21(5): 665—670.
- [3] Lindell I V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, et al. Bw media-media with negative parameters, capable of supporting backward waves [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, 31: 129—133.
- [4] Ramesh Garg. *Microstrip Antenna Design Handbook* [M]. Boston: Artech House, 2001.
- [5] WU Zhan-Zhan, XU Shan-Jia. Rigorous mode matching analysis of transmission characteristics for periodic dielectric structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (伍瞻瞻, 徐善驾. 周期介质结构传输特性的严格模匹配分析. 红外与毫米波学报), 2004, 23(1): 21—26.
- [6] JING Heng-Zhen, XU Shan-Jia. Mode matching analysis of a new omnidirectional circular rod antenna with double dielectric gratings for millimeter-wave application [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (靖恒珍, 徐善驾. 新型双介质栅毫米波棒形全向天线的模匹配分析. 红外与毫米波学报), 2003, 22(4): 241—245.

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>