

天馈线伺服系统

基于 LTCC 超材料基板的小型化 V 波段 毫米波微带天线设计

刘振哲 汪 澄

(电子科技大学 成都 611731)

【摘要】本文介绍了一种基于 LTCC 超材料 (metamaterials) 基板的小型化 V 波段毫米波微带天线设计。通过 HFSS 仿真软件获得 LTCC 超材料基板的 S 参数, 使用改进的 S 参数提取方法获得材料的等效介电常数和磁导率。利用 LTCC 超材料替代普通介质基板, 实现了毫米波微带天线的小型化, 并与常规介质基板天线的性能进行了对比。

关键词: LTCC; 超材料; 小型化; 毫米波微带天线

中图分类号: TN 82 文献标志码: A 文章编号: 1008-8652(2012)03-072-04

Design of A Miniaturized V – band Millimeter Wave Microstrip Antenna Based on LTCC Metamaterials Substrate

Liu Zhenzhe, Wang Peng

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

Abstract: A miniaturized V-band millimeter wave microstrip antenna is designed based on low temperature co-fired ceramic (LTCC) metamaterials substrate. S parameters of the LTCC metamaterials substrate is obtained through simulation by using of HFSS software; equivalent permittivity and permeability of the materials are obtained by way of improved S parameter extraction method. A millimeter wave microstrip antenna is developed by replacing common dielectric substrate with LTCC metamaterials substrate, and comparison result between performance of this antenna and that of antenna based on common dielectric substrate are given.

Keywords: LTCC; metamaterials; miniaturization; millimeter wave microstrip antenna

1 引言

随着电子技术的发展, 高增益、宽频带的毫米波天线, 被广泛应用于无线通信、车载雷达、机载天线等商业、军事领域^[1]。毫米波微带天线因具有体积小、重量轻、剖面薄、馈电方式灵活, 在雾、雪和尘埃等气候条件下有良好的传播特性等优点而倍受青睐。目前, V 波段中 76GHz ~ 77GHz 被应用于汽车自动驾驶系统中的避撞雷达, 这就对毫米波微带天线的尺寸小型化提出了更高的要求^[2]。

提高介质基板的特征参数(μ_r, ϵ_r)是实现微带天线小型化的重要途径^[3]。由于表面波效应, 高介电常数基板存在辐射效率低, 阻抗匹配困难等问题。高磁导率材料基板被用来替代高介电常数材料基板^[4]。然而磁性材料存在笨重、损耗大、千兆频段后磁性衰减等缺点, 不适于毫米波领域的应用, 但近年来蓬勃发展的超材料 (metamaterials) 对解决此问题带来无限的生机。

超材料可以实现丰富广泛的介电常数值和磁导率值, 达到许多自然材料不能达到的值域空间, 甚至

可以控制材料在空间的非均匀分布,从而实现许多常规材料无法实现的性质和功能^[5]。本文采用超材料即通过微金属结构实现电磁谐振来获得具有高等效电磁参数的介质,应用 LTCC 超材料基板,设计了一款工作在 76GHz ~ 77GHz 的小型化 V 波段毫米波微带天线。

2 S 参数提取法

超材料的特性分析,首先是从等效媒质参数入手,S 参数提取法^[6]目前已经被广泛用来分析超材料的电磁特性行为。磁导率 μ 和介电常数 ϵ 与 n 和 z 之间的关系为^[7]:

$$\epsilon = n/z, \quad \mu = nz$$

根据参考文献[6],折射率 n 和波阻抗 z 可以通过以下两个公式计算:

$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right]$$

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}$$

由于考虑的是无源介质,上式的符号由以下条件决定:

$$z' \geq 0$$

$$n'' \geq 0$$

z' 和 n'' 分别代表 z 的实部和 n 的虚部。

上式中, n 和 z 是分别来求取的,以致在求解 n 的过程中就会遇到很多麻烦,比如余弦函数的多值问题以及正负号的确定等问题。借助改进的基于 S 参数的参数提取法^[8],先求解 z ,然后再由下式求解 n 。

$$n = \frac{\ln \left(\frac{S_{21}}{1 - S_{11}} \frac{z - 1}{z + 1} \right)}{iK_0 d}$$

该方法利用了各参数之间的内在联系来提取参数,而不是通常的利用 S 参数来单独提取各个参数,从而保证了参数提取结果的一致性。

3 LTCC 超材料基板设计

单负磁导率媒质可以通过开口谐振环(Split Ring Resonator,简称 SRR)结构来实现。当磁场垂直于谐振环平面入射时,会激起强烈的磁谐振。在万方数据

低于磁谐振频率附近,SRR 表现出大的磁导率,在磁谐振频率之后磁导率迅速变为负值,并逐渐增大。SRR 结构的几何参数决定谐振频率,毫米波频段要求 SRR 结构的尺寸小于 1mm^[9]。

LTCC 技术是一种陶瓷多层基板技术,采用叠层工艺,易于制造复杂的三维结构^[10],非常适用于超材料器件研究所需要的多层复杂金属结构的加工和制作。本文采用 LTCC 技术设计超材料基板,根据前人提出的典型结构,设计了工作在毫米波段的改进 SRR 结构,微金属结构被印制在多层基片上,各层之间通过通孔进行上下互连,如图 1 所示。

本设计中,介质基板采用 Ferro A6 陶瓷薄膜,介电常数为 $5.9 + j0.0118$,磁导率为 1。通过电磁仿真软件 HFSS 进行仿真优化,每一层的厚度 d 为 $100\mu\text{m}$,共分三层,总厚度为 $300\mu\text{m}$ 。每个 SRR 结构由两个开口谐振环组成。开口谐振环金属线的长度为 $360\mu\text{m}$,宽度为 $50\mu\text{m}$,金属线的厚度为 $10\mu\text{m}$,开口间距为 $50\mu\text{m}$,上下两层金属线通过两个通孔进行互连,通孔的半径为 $25\mu\text{m}$,两个环之间的距离为 $250\mu\text{m}$ 。

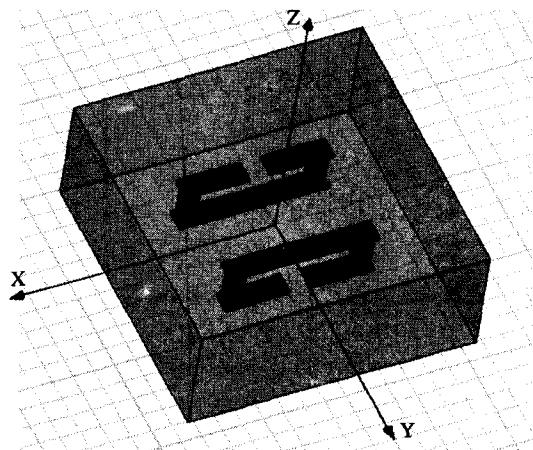
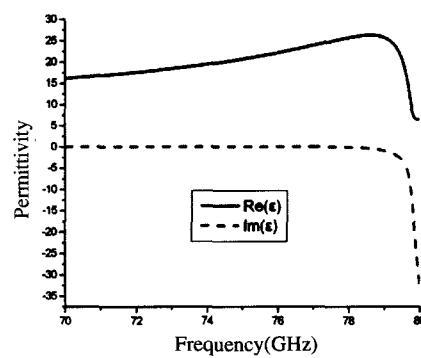
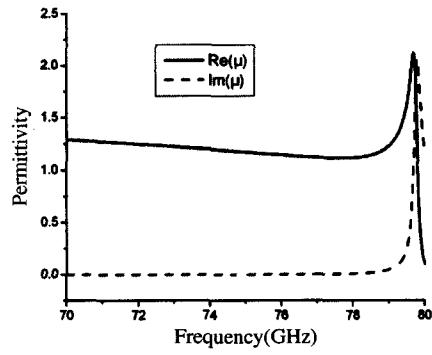


图 1 LTCC 超材料基板

利用三维电磁仿真软件 HFSS 来得到该种材料的 S 参数(S_{11} 和 S_{21}),根据改进后的 S 参数提取方法,提取设计的 LTCC 超材料基板的等效介电常数和等效磁导率。提取的等效电磁参数如图 2 所示。从图 2 中可以看出,SRR 结构谐振频率为 80GHz ,在谐振点附近 μ_r 和 ϵ_r 虚部不为零,说明损耗很大,因此天线的工作频率一般要选择低于谐振频率。在 $76\text{GHz} \sim 77\text{GHz}$,LTCC 基板具有高的等效介电常数($\epsilon_r > 22$)和等效磁导率($\mu_r > 1.2$),从而可以有效实现微带天线的小型化。



(a) 等效介电常数



(b) 等效磁导率

图 2 LTCC 基板介质材料的等效介电常数和磁导率

4 V 波段毫米波微带天线设计

基于以上的 LTCC 超材料基板,本文设计了一款 V 波段毫米波矩形微带天线。该天线工作在 76GHz ~ 77GHz,采用同轴馈电方式,其结构如图 3 所示。贴片的长度 (L) 为 350μm, 宽度 (W) 为 360μm, 厚度为 10μm。本文对 LTCC 基板中是否加入 SRR 结构的相同尺寸天线进行了仿真对比。

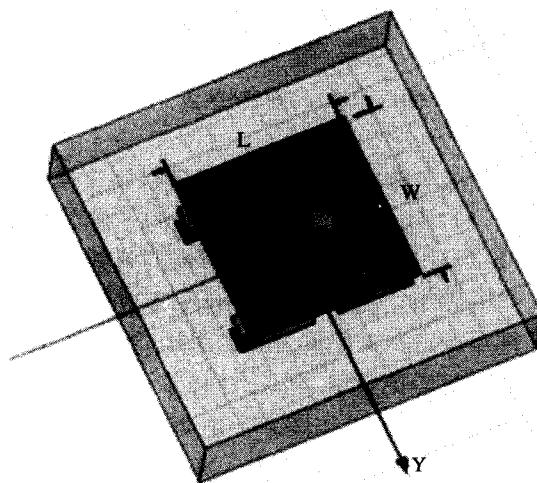
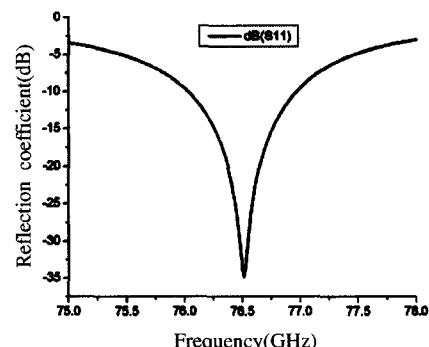
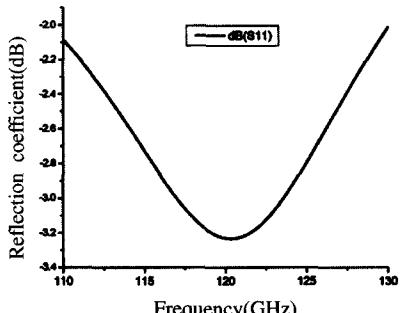


图 3 基于 LTCC 超材料基板的微带天线

如图 4(a)所示,所设计的微带天线谐振频率为 76.5GHz, 工作带宽为 76 GHz ~ 77GHz, 满足设计要求。基板不加载 SRR 结构, 天线的谐振频率在 120GHz, 并且 SRR 结构对天线的阻抗匹配影响很大, 如图 4 (b) 所示。为了将谐振频率调整到 76.5GHz, 需要调整贴片的尺寸到 700μm × 800μm, 并重新确定馈电位置。调整后, 反射系数仿真如图 5 所示。相同谐振频率下, 是否加载 SRR 结构的天线增益仿真结果如图 6 所示。



(a) LTCC 介质基板加载 SRR 结构



(b) LTCC 介质基板未加载 SRR 结构

图 4 相同贴片尺寸, 天线反射系数仿真曲线

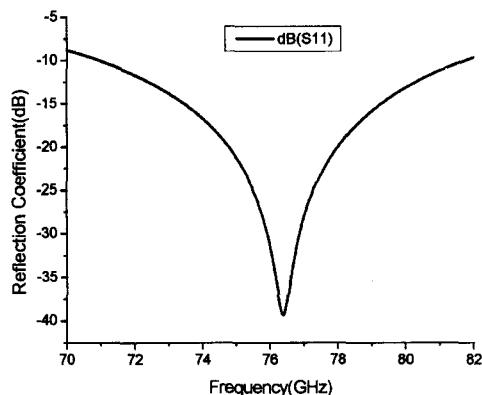


图 5 谐振频率在 76.5GHz, LTCC 介质基板未加载 SRR 结构天线反射系数仿真曲线

从图5可以看出,不加载SRR结构,天线带宽将达到10GHz以上,这必然会引入大量的干扰信号,导致后续部分需要额外增加滤波器。通过在LTCC基板中内埋SRR结构,天线尺寸缩小到仅为原来的22.5%,从图4(a)、图5、图6中可以看出,天线尺寸的大幅减小导致了带宽和增益的下降。如何在减小天线尺寸的前提下,提高带宽、增益等指标,是当今小型化天线的热点问题,也将是我们下一步的研究方向。

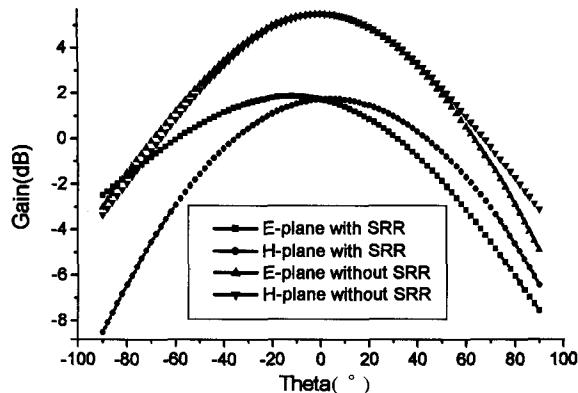


图6 谐振频率在76.5GHz,天线E面增益和H面增益

5 结论

本文设计了一款工作在76GHz~77GHz的V波段LTCC毫米波微带天线。通过在LTCC基板中加入改进的SRR结构,在指定频段内获得了高的等效介电常数和磁导率,天线尺寸缩小为原来的22.5%,证实了超材料基板可以有效减小天线尺寸。该天线适用于汽车自动驾驶技术避撞雷达领域,具有广阔的研究与应用价值。

参考文献:

[1] In Kwang Kim, Vasundara V. Varadan. LTCC

Metamaterial Substrates for Millimeter-Wave Applications [C]. IEEE Region 5 Technical Conference, April 20~21, Fayetteville, AR, 2007.

- [2] H. S. Lee, J. G. Kim, S. Hong, J. B. Yoon. Micromachined CPW-Fed Suspended Patch Antenna for 77GHz Automotive Radar Applications [C]. Wireless Technology, 2005. The European, 249~252.
- [3] 肖珍龙. 小型化多频段陶瓷天线设计 [D]. 北京:北京邮电大学, 2011.
- [4] H. Mosallaei, K. Sarabandi. Magneto-Dielectrics in Electromagnetics: Concept and Applications [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2004, 52(6):1558~1567.
- [5] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11):2075~2084.
- [6] D. R. Smith, S. Schultz, P. Marko, and C. M. Soukoulis. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [C]. Phys. Rev. B, 2002, 65:195104.
- [7] David M. Pozar. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明等译. 微波工程(第三版) [M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [8] 毛旭彤, 段兆云等. 一种改进的参数提取方法 [J]. 微波学报, 2010, 8.
- [9] 吴群, 孟繁义, 傅佳辉. 超材料理论及其应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- [10] 刘新宇. 微波LTCC电路模型研究 [D]. 成都:电子科技大学, 2010.

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>