

用双负材料改善微带天线阻抗带宽

马凤军, 万国宾, 沈 静, 王振宇

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

摘要: 针对微带天线带宽较窄的问题, 采用基于有限元法的 HFSS 软件, 设计 1 种以双负材料为衬底的微带天线。仿真计算其反射系数, 并给出测试结果。对仿真与测试结果进行比较分析表明, 相对于同样尺寸以普通材料为衬底的微带天线, 以双负材料为衬底的微带天线的带宽展宽约为 50%, 在中心频率的相对带宽也达到 16.6%。

关键词: 双负材料; 微带天线; 反射系数; 阻抗带宽; HFSS

中图分类号: TN820.1; O241.82; TP391.9 文献标志码: A

Performance improvement of microstrip antenna using double negative media

MA Fengjun, WAN Guobin, SHEN Jing, WANG Zhenyu

(School of Electronics & Info., Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: With the narrow bandwidth of microstrip antenna, a microstrip antenna with the substrates of double negative media is designed by the software HFSS which is based on finite element method. Its reflection coefficient is simulated and the test results are given. The simulation results and the test results are compared and analyzed, and it is shown that the bandwidth increases 50% compared with the same size of the microstrip antenna with ordinary materials, and the relative bandwidth reaches 16.6% in the center frequency.

Key words: double negative media; microstrip antenna; reflection coefficient; impedance bandwidth; HFSS

0 引言

21 世纪以来, 1 种被称为“双负材料”的人工复合材料在固体物理、材料科学、光学以及应用电磁学领域受到愈来愈广泛的青睐, 对其研究正呈现迅速发展之势。早在 1968 年, VESELAGO^[1]首次指出, 当 ϵ 与 μ 同时为负数时, Maxwell 方程仍然成立, 但电

磁波将逆于波矢方向传播, 并可表现出一些奇异的电磁特性, 如逆普拉特效应、逆湿涅尔折射效应及逆 Cerenkov 辐射效应等。可以想象, 这样的介质如能够被发现或人工制造出来并付诸应用, 必将对人类的科技和生活等诸多方面产生极大影响。

1996 年, 英国皇家学院 PENDRY 指出可利用金属导线阵列构造介电常数为负媒质, 1999 年又指出

收稿日期: 2007-06-18 修回日期: 2007-08-17

基金项目: 航空科学基金(2006ZC53040)

作者简介: 马凤军(1982—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向为电磁辐射特性分析及计算机仿真, (E-mail) makill2000@gmail.com;

万国宾(1967—), 男, 河南新乡人, 教授, 博导, 研究方向为雷达罩分析与设计、天线理论及电磁散射数值分析等,
(E-mail) gb.wan@hotmail.com

可用谐振环阵列构造磁导率为负的人工媒质。^[2,3]2001年美国加州大学圣迭戈分校的SHELBY等^[4]在Science杂志上发表文章,沿用PENDRY的方法,构造出介电常数与磁导率同时为负的人工媒质,并通过实验观察到微波频段的电磁波通过这种人工媒质与空气的交界面时发生的“负折射”现象。从此,这类人工媒质的研究成为国际电磁学界引人注目的前沿领域之一并引发热烈讨论。

微带天线在航空航天领域应用前景广阔,天线工程师和从事计算电磁学的研究者^[5,6]已进行不同衬底材料对微带天线电磁特性影响的研究。

本文首先给出微带天线理论模型,采用基于有限元法的HFSS软件,仿真计算普通微带天线的反射系数。在此基础上,设计以双负材料为基质的微带天线,仿真计算双负微带天线的反射系数;并给出双负微带天线的测试结果,进行分析和比较,探索双负材料展宽微带天线阻抗带宽的可能。

1 双负微带天线的理论模型

1.1 微带天线内场分析

矩形微带贴片天线模型见图1。

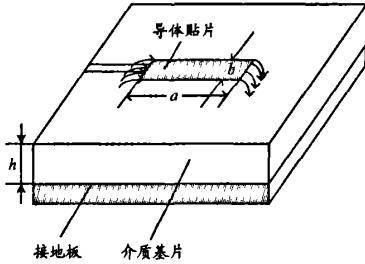


图1 矩形微带贴片天线模型

微带天线由接地板、介质基片和导体贴片构成。其中,介质基片的厚度为 h ,导体贴片长度为 a ,宽度为 b 。根据腔模理论^[7],当微带天线厚度 $h \ll \lambda_0$ 时,贴片与接地板之间的场可以作以下假定:(1)电场只有 E_z 分量,磁场只有 H_x 和 H_y 分量,即这是对 z 向的TM型场;(2)内场不随 z 坐标变化;(3)四周边缘处电流无法向分量,即边缘处切向磁场为0,故空腔四周可视为磁壁。

其内场一般解的表达式为

$$E_z = \sum_{m,n} B_{m,n} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \quad (1)$$

$$H_x = \sum_{m,n} -j \frac{B_{m,n} n\pi}{\omega\mu_0 b} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2)$$

$$H_y = \sum_{m,n} j \frac{B_{m,n} m\pi}{\omega\mu_0 a} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \quad (3)$$

其中:

$$B_{m,n} = jk_0 \eta_0 I_0 \frac{ab}{k^2 - k_{mn}^2} \cos \frac{m\pi x_0}{a} \cos \frac{n\pi y_0}{b} j_0 \left(\frac{m\pi d_0}{2a} \right) \quad (4)$$

$$\delta_{op} = \begin{cases} 2, & p \neq 0 \\ 1, & p = 0 \end{cases} \quad (5)$$

k_{mn} 是谐振模的截止波数,为实数,由天线尺寸和模序号 m 和 n 决定; $k \approx k_0 \sqrt{\epsilon_r}$,当 k 十分接近 k_{mn} 时,第 (m,n) 项的振幅很大,内场基本由该项决定,即通常说的 TM_{mn} 模谐振。

1.2 微带天线的阻抗带宽

天线的阻抗带宽通常根据反射损失(或驻波比)来定义。当天线工作于 TM_{mn} 模时,作为1阶近似,可略去高阶模所形成的串联小电感,于是可以得到矩形微带天线的等效电路,见图2。

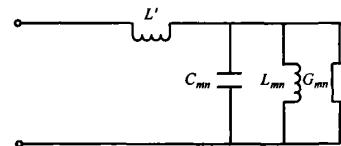


图2 微带天线等效电路简化模型

该电路的输入阻抗

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{R_{mn}} + j \left(\omega C_{mn} - \frac{1}{\omega L_{mn}} \right)} \quad (6)$$

因电路的谐振频率 $\omega_{mn} = 2\pi f_{mn} = 1/\sqrt{L_{mn} C_{mn}}$, $Q = R_{mn}/\sqrt{L_{mn}/C_{mn}}$,上式可写为

$$Z_{in} = \frac{R_{mn}}{1 + jQ \left(\frac{f}{f_{mn}} - \frac{f_{mn}}{f} \right)} \quad (7)$$

若天线在谐振频率上与馈线匹配,即谐振电阻 R_{mn} 等于馈线的特性阻抗,则馈线上反射系数模值

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_{in} - R_{mn}}{Z_{in} + R_{mn}} \right| = \left[1 + \frac{4}{Q^2 \left(\frac{f}{f_{mn}} - \frac{f_{mn}}{f} \right)^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

从而得到

$$f_L = -\frac{|\Gamma|}{\sqrt{1 - \Gamma^2} Q} f_{mn} + \left[\frac{\Gamma^2}{(1 - \Gamma^2) Q^2} + f_{mn}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$f_H = \frac{|\Gamma|}{\sqrt{1 - \Gamma^2} Q} f_{mn} + \left[\frac{\Gamma^2}{(1 - \Gamma^2) Q^2} + f_{mn}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中: $Q \approx Q_r = \frac{3b\epsilon_r\lambda_0}{4ah\delta_{om}\delta_{on}}$

根据馈电端口的反射系数要求确定天线的阻抗带宽,将对应的 Γ 值带入式(9)和(10),即可求出上下限频率,从而确定微带天线的阻抗带宽。

1.3 双负微带天线设计

双负微带天线结构见图 3 和 4。

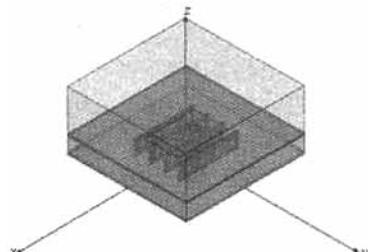


图 3 双负微带天线仿真模型

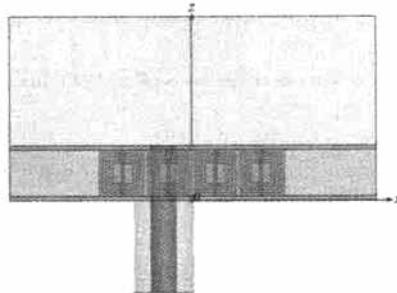


图 4 双负微带天线 xoz 面剖面图

采用基于金属谐振环/金属丝结构的双负材料。实现双负特性对入射电磁波的要求是:电场分量要与金属丝轴向平行,磁场分量要穿过谐振环,材料才能在该方向上呈现出双负特性。采用同轴线馈电,馈电点在 x 轴上变化,工作在 TM_{10} 模,由式(2)可知 $H_x = 0$,从而保证磁场 H 穿过谐振环,而电场 E_x 平行于金属丝,满足双负材料对入射电磁波的要求。

2 数值结果分析

首先给出 1 组普通和双负微带天线的 S_{11} 仿真曲线,见图 5 和 6。

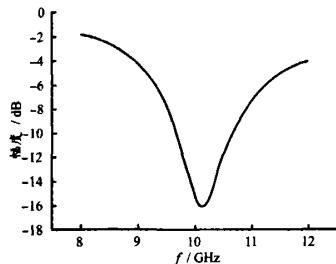


图 5 普通微带天线的 S_{11} 仿真曲线

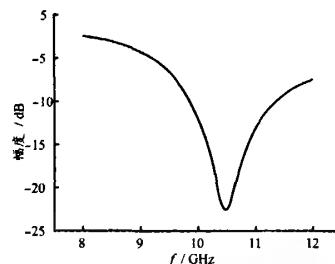


图 6 双负微带天线的 S_{11} 仿真曲线

图 5 和 6 所用普通微带天线介质尺寸为 $16\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,矩形贴片尺寸为 $8.45\text{ mm} \times 5.6\text{ mm}$,介质基片的相对介电常数为 2.4,同轴探针馈电点在 x 轴上。双负微带天线介质尺寸和矩形贴片尺寸与普通微带天线相同,介质基片材料为 4×4 单元的双负材料;相对介电常数为 -2.4,同轴探针馈电点在 x 轴上。由图 5 和 6 可知,双负材料微带天线的反射系数模值在 -10 dB 以下带宽为 1.51 GHz,而同样尺寸下普通材料微带天线带宽约为 0.96 GHz,带宽展宽约 50%。

为了验证上述双负微带天线设计的正确性,加工并测试双负微带天线。其介质尺寸为 $10\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,矩形贴片尺寸为 $8.45\text{ mm} \times 5.6\text{ mm}$,介质基片材料为 36×40 单元的双负材料;相对介电常数为 -2.65,同轴探针馈电点在 x 轴上。其输入阻抗和 S_{11} 测试曲线分别见图 7 和 8。

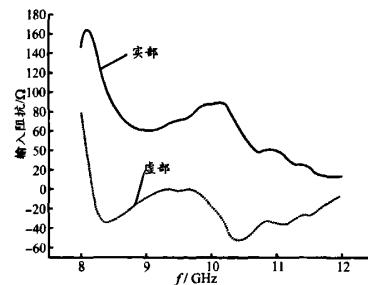


图 7 双负天线的输入阻抗测试曲线

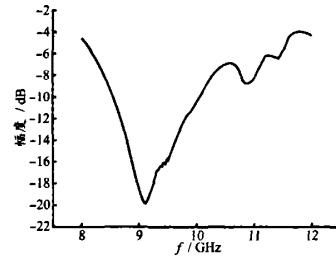


图 8 双负天线的 S_{11} 测试曲线

由图 7 可知,双负背腔微带天线在谐振频率点上测试的阻抗特性比较理想,实部约 60Ω ,虚部接近 0,大致与同轴线特性阻抗(50Ω)匹配。由图 8 可

知,实测双负材料微带天线-10 dB以下带宽为1.50 GHz(8.55~10.05 GHz),大致与仿真一致.与同样尺寸下普通材料微带天线-10 dB以下带宽相比,带宽展宽约50%,在中心频率的相对带宽也达到16.6%.

3 结束语

探索双负材料在改善微带天线阻抗带宽中的应

用,设计1种以双负材料为基质的微带天线,加工并测试其性能,测试结果与仿真结果对比较吻合,验证双负微带天线设计理论的正确性.测试结果表明,双负微带天线 $S_{11} < -10$ dB的带宽明显优于同样尺寸下的普通天线,带宽展宽50%,在中心频率的相对带宽也达16.6%.同时,本文设计的双负微带天线尚未进行优化,优化后结果应更为理想,从而说明双负材料可以很好地改善微带天线的阻抗带宽.

参考文献:

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Phys, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Phys Rev Letter, 1996, 76(25): 4 773-4 776.
- [3] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2 075-2 084.
- [4] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(6): 77-79.
- [5] BILOTTI F, TOSCANO A, VEGNI L. FEM-BEM formulation for the analysis of cavity-backed patch antennas on chiral substrates [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2003, 51(2): 306-310.
- [6] BILOTTI F, TOSCANO A, VEGNI L. Radiation and scattering features of patch antennas with bianisotropic substrates [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2003, 51(3): 449-456.
- [7] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991: 18-50.

(编辑 廖粤新)

(上接第16页)

好,表明用仿真分析方法指导产品设计,不仅能够缩短设计周期、节约设计成本,而且能够保证设计产品

的使用安全性,这种设计方法较适合该类产品工业设计的需要.

3 结论

针对180 t平板车液压调平系统,采用MSC Easy5对系统进行仿真,并对调平系统的设计参数进行评价和改进.在仿真指导下重新进行设计选型,改进后的仿真结果表明,液压调平系统的快速响应性和动态跟踪能力都有很大改善.这种仿真分析方法对以后平板车的液压悬挂调平系统设计制造以及控制算法的研究都具有一定的实际工程意义.

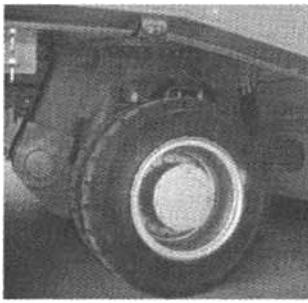


图5 按仿真指导选择系统参数设计的液压悬架

参考文献:

- [1] FRITZ N, ELSAWY A, MODLER K H, et al. Simulation of mechanical drivers with Easy5 [J]. Comput Industrial Eng, 1999, 37(1-2): 231-234.
- [2] 陆元章. 液压系统的建模与分析 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [3] 朱小明. 比例多路换向阀在工程机械中的应用 [J]. 建筑机械, 2006(4): 87-90.
- [4] 谭巍. 拖拉机液压悬挂和加载系统性能研究 [D]. 中国农业大学, 2004.
- [5] 陈亚琛, 金晓宏. 基于Easy5的液压ACC油源系统的动态仿真 [J]. 机床与液压, 2006(2): 194-196.
- [6] 厉军, 赵玉珊, 魏立基. 电液比例控制多缸自适应调平液压系统 [J]. 液压与气动, 2003(10): 27-28.
- [7] 刘浩亮. 基于MSC Easy5液压自动调平方舱振动分析 [J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(S1): 281-283.

(编辑 廖粤新)

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>