2015 年 8 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2015)04-0601-04

使用非均匀特异媒质覆层的高增益谐振腔天线

左 腾,谭菲菲,陈 星

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:采用非均匀特异媒质覆层,设计了一种具有高增益特性的新型谐振腔天线。该谐振 腔天线采用矩形微带贴片天线作为辐射单元,安装在金属谐振腔内,其谐振频率为 10 GHz。为提 高天线增益,将腔表面安装蚀刻在微带基板上,由周期性单元组成特异媒质覆层。迥异于常规的 单元尺寸均匀一致特异媒质覆层,本文研制的非均匀特异媒质覆层包含 9×9个矩形单元,单元大 小渐变。仿真表明,与常规均匀特异媒质覆层相比,该新颖的非均匀特异媒质覆层相当大程度提 升了天线定向辐射性能:天线增益提高 1.2 dB(从 20.3 dBi 增加到 21.5 dBi),天线的旁瓣得到了抑制,主旁瓣比下降 5 dB; 同时,天线谐振频率和阻抗带宽等其他性能基本保持不变。

关键词:谐振腔天线;非均匀特异媒质;高增益

中图分类号: TN828.4 文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0601

A resonant cavity antenna with a non-uniform metamaterial superstrate

ZUO Teng, TAN Feifei, CHEN Xing

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A Resonant Cavity Antenna(RCA) with a non-uniform metamaterial superstrate is proposed. A rectangular patch antenna, working at 10 GHz, is placed in a cavity as a primary source. A superstrate printed with square metal patches is placed in front of the antenna in order to increase the gain. Different from normal uniform metamaterial superstrate, the proposed structure consists of 9×9 units with different sizes. Simulation results demonstrate that the directivity of non-uniform metamaterial superstrate RCA increases by 1.2 dB(from 20.3 dBi to 21.5 dBi), and the side lobe is suppressed(the main-to-sidelobe ratio decreases by 5 dB), while the other properties like antenna resonant frequency and impedance bandwidth remain unchanged almost.

Key words: Resonant Cavity Antenna; non-uniform metamaterial superstrate; high gain

高增益天线有着很广泛的应用,尤其在通信、定位、输能等方面。这类天线一直是研究的重点,以微带阵 列天线为例,微带天线一直很受人关注,因为微带天线具有低剖面、低成本、易加工等特点。单个微带贴片的 增益通常不高,为实现较高的增益,一般使用很多贴片天线作为单元组成大的阵列。天线阵列由馈电网络馈 电,而馈电网络会给天线系统引入一定的插入损耗,造成能量损失。天线的阵列越大,则馈电网络越复杂,这 是不希望看到的。在某些应用中,希望使用单个馈源实现高增益,减少在功分系统中损耗的能量。

谐振腔天线(Resonant Cavity Antenna, RCA)就是一类能够以相对简单的结构实现高增益的天线^[1]。这类天 线使用偶极子或者微带贴片天线等作为初级馈源,馈源放在接地板上或接地板前方。在接地板上方平行覆盖一 个高反射系数的上层覆板,接地板和覆板之间的距离通常约为半波长的整数倍,上下 2 层板构成一个谐振腔。 这很类似于光学中的法布里珀罗干涉仪,所有又称 F-P 天线(Fabry-Perot Antenna, FPA)^[2],电磁波在地板和覆 板之间反复反射,在覆板上达到同相叠加辐射出去,因此天线具有很高的定向性^[3]。天线的覆层通常有 2 种形 式,一种是高介电常数的均匀介质板^[4];另一种是特异媒质(Metamaterial, MTM),如频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)^[5]、双负材料(Double Negative, DNG)^[6]、电磁带隙结构(Electromagnetic Band Gap, EBG)^[7]等。有学者对各种周期性特异媒质作为覆板进行研究^[8-9],表明各种结构虽然有不同的反射特性,但是同 样可以用来设计高增益天线。除此之外,特异媒质还有广泛的应用^[10]。这类天线只使用了单个馈源,因此和微 带阵列天线相比,可以不使用功分网络。

目前,天线设计绝大多数采用均匀特异媒质层,通常做法是在微带基板上蚀刻结构和尺寸完全一致的周期 性单元。本文提出使用非均匀的特异媒质层的谐振腔天线,天线覆板上的金属贴片单元的大小不再是均匀的, 是由内向外减小的。由于改变特异媒质单元的大小,会改变其反射特性,因此口径面上的电场分布会改变,这 样有利于实现更高的增益。本文分别仿真了这 2 个天线,并对仿真结果进行了对比。证明了非均匀的设计有助 于提升天线增益。

1 谐振腔天线

1.1 部分反射

1956年, Trentini 首先提出了 Fabry-Perot 谐振腔能够提升天 线的增益^[11], Fabry-Perot 谐振腔由金属地板和部分反射层构成。 部分反射层具有高反射特性(图 1),当电磁波入射到部分反射平 面时,大部分能量将反射回去而少部分能量透射过去,能量在部 分反射层和接地板之间产生往复的多次反射。根据之前的研究可 知^[10],当L取值合适时,可以使天线轴向的增益达到最大。

$$L = -\frac{N\lambda}{2} + \left(\frac{\Phi_{\rm g} + \Phi_{\rm r}}{\pi}\right)\frac{\lambda}{4}, \ N = 0, 1, \cdots$$
(1)



式中: L 为两板间距离(见图 3(a)), $\boldsymbol{\sigma}_{g}$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_{r}$ 为地板和部分反射层的反射相位,已知 $\boldsymbol{\sigma}_{g}$ =180°,所以当已知 $\boldsymbol{\sigma}_{r}$ 时,可以得出L,使天线轴向增益达到最大。若部分反射层的反射系数模值为 $|\boldsymbol{R}|$,最大的增益可以表示为^[3]:

$$D_{\max} = \frac{1 + |\boldsymbol{R}|}{1 - |\boldsymbol{R}|} \tag{2}$$

本文设计的均匀部分反射层如图 2 所示。图 2(b)是部分 反射层的特异媒质单元,特异媒质单元是在正方形介质板一 侧居中印刷一个金属贴片,介质板宽度为 S=11.1 mm,厚度 $s_h=1$ mm,介电常数 ε_r 为 2.65。金属贴片宽度为 P=10 mm。 通过仿真可以得到周期性特异媒质单元的反射特性如图 2 所 示,当f = 10 GHz 时,反射系数幅值接近 0.935,反射系数 约为–158°。将仿真得到的反射相位,代入公式(1)中可以初 步得到间距 L。图 2(a)为完整的部分反射层,特异媒质单元 周期性印刷在介质板中央,一共 9×9 个单元,介质板的宽度 w=123.8 mm。



本文首先设计了一个使用均匀特异媒 质层的谐振腔天线,前一小节介绍了均匀 的特异媒质层,把这个特异媒质层加入到 天线的设计当中。天线结构如图 3 所示, 使用一个微带贴片天线作为馈源,特异媒 质层位于贴片天线上方,其中 L 通过公式 计算并实际仿真进行微调。天线的四周围 上 4 片金属片,金属片两侧分别和特异媒 质层相连,相互连接构成了一个腔体,馈





人能量只能通过特异媒质层缝隙辐射出去。贴片天线介质板宽度 s_w =15 mm, 厚度 p_h =2 mm,相对介电常数为 2.65。贴片天线长为 p_i =7.85 mm,宽为 p_w =11.85 mm,馈点沿 x 轴居中,沿 y 轴距离中心 p_s =4.55 mm。通过计算并使用计算机优化得到距离 L=31.2 mm,天线工作在 10 GHz,天线的工作特性在 2.2 中有详细介绍。

1.0

2 改进的谐振腔天线

左

2.1 非均匀设计

本文对均匀覆层的谐振腔天线进行了仿真,天线实现了较高 的增益,为了进一步提高增益,本文做了非均匀的设计。在特异 媒质所在平面上,贴片天线辐射的能量并不是均匀的,中间强而 四周弱,因此希望通过使用非均匀的特异媒质层来改善特异媒质 层表面的电场均匀性。在辐射强的地方,反射层的反射系数也较 大,从而减少透过的能量,而在辐射弱的地方,使反射层的反射 系数较小,从而透过更多的能量,使特异媒质层表面的能量密度 更一致。

考察单元边长和反射特性的关系,当改变金属贴片边长时,可 以得到相对应的 10 GHz 处的反射系数,如图 4 所示,随着金属贴 片边长增大,特异媒质层的反射系数幅值随之增大,反射相位也 越接近-180°。

所设计的非均匀特异媒质层如图 5 所示,整个平面按照环形 进行设计,这样的设计能够使用较少的参数覆盖更大的面积,从 中间到边缘,特异媒质层的贴片单元逐渐减小。图中虚线穿过的 贴片大小一致,统一编号,由内向外依次减小,下面的表 1 给出 了各编号贴片的详细大小,最终得到的结果是由计算机自动优化 得到的。天线的其他部分和均匀特异媒质层天线基本相同,其中 L=31.5 mm。贴片天线的参数做了优化以达到更好的匹配,其中, p_1 =8.15 mm, p_w =9.87 mm, p_s =4.52 mm_o

表1 各层特异媒质单元的大小					
Table1 Dimensions of metamaterial units					
number	1	2	3	4	5
size/mm	11.29	10.48	10.36	8.83	5.79

2.2 结果分析

分别仿真了使用均匀和非均匀特异媒质层的天线,并进行对 比, 2个天线都工作在 10 GHz。反射系数如图 6 所示, |S11|<-10 dB 阻抗带宽基本相同,相对带宽约为2%(200 MHz)左右。

图 7 分别展示了使用均匀特异媒质层(图 7(a))和非均匀特异媒 质层(图 7(b))的谐振腔天线在 10 GHz 处的辐射方向图。天线最大的 辐射方向仍垂直于特异媒质层平面,天线的极化方式和作为馈源的 微带贴片天线相同。均匀特异媒质层天线在 10 GHz 处增益为 20.3 dBi, 主旁瓣比大于 14 dB, E 面和 H 面波束宽度分别为 11.7°和 16.6°。将天线改为使用非均匀特异媒质层后,天线在 10 GHz 处增 益提升至 21.5 dBi, 主旁瓣比大于 19 dBi, E 面和 H 面的波束宽度 变为 13.6°和 14.2°。图 8 为天线轴向增益随频率变化的情况,使用 非均匀的特异媒质层,天线在较宽频带范围内提升了天线的增益。

160 0.7 -170 0.6 7.0 9.0 9.5 10.0 10.5 11.0 7.5 8.0 8.5 length of metal patch/mm Fig.4 Reflection coefficients with respect to the length of metal patches 图 4 金属微带长度对反射系数的影响 ØØ Ű 2 3 4 10 Fig.5 Non-uniform MTM superstrate 图 5 非均匀特异媒质层 uniform ----non-unform reflection coefficient -20 -30 10.50 9.50 9.75 10.00 10.25 ƒ∕GHz

Fig.6 Reflection coefficients of the uniform and non-uniform MTM superstrate RCA 图 6 使用均匀和非均匀特异媒质层的谐振腔 天线的反射系数

结论 3

本文探讨了谐振腔天线的特异媒质层形式,提出使用非均匀的特异媒质层来提高天线的增益。首先设计了 一个工作在 10 GHz 的均匀特异媒质谐振腔天线,在此基础上,改变特异媒质层的形式,使用渐变的回字形结 构。仿真结果表明,与均匀特异媒质覆层相比,采用非均匀特异媒质覆层后,天线的增益提升了 1.2 dB,从 20.3 dBi 提升到了 21.5 dBi。天线的旁瓣也得到抑制,下降了 5 dB,同时天线的其他性能基本保持不变。因此 本文研究证明,使用非均匀的特异媒质覆层,可以在一定程度上提升天线的增益。

130



amplitude

_



参考文献:

- [1] Foroozesh A,Shafai L. Modeling, simulation, design and fabrication of a high-gain cavity resonance antenna having a highly-reflective patch-type FSS superstrate[C]// Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting, 2009. Toronto:IEEE, 2009:1-4.
- [2] Mateo-Segura C, Feresidis A P, Goussetis G. Analysis of broadband highly-directive Fabry-Perot cavity leaky-wave antennas with two periodic layers[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium(APSURSI), 2010. Toronto:IEEE, 2010:1-4.
- [3] Feresidis A P,Goussetis G,WANG S,et al. Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile highgain planar antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2005,53(1):209-215.
- [4] ZHU L, Joishi I, Yamashita E. Characterization of microstrip patch antennas suspended by a dielectric superstrate with high permittivity[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium, 1996. Baltimore, MD, USA: IEEE, 1996:704-707.
- [5] Foroozesh A, Shafai L. Investigation into the effects of the patch-type FSS superstrate on the high-gain cavity resonance antenna design[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010,58(2):258-270.
- [6] Mittra R,LI Y,Yoo K. A comparative study of directivity enhancement of microstrip patch antennas with using three different superstrates[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010,52(2):327-331.
- [7] Weily A R,Esselle K P,Sanders B C,et al. High-gain 1D EBG resonator antenna[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2005,47(2):107-114.
- [8] Foroozesh A, Shafai L. On the design of high-gain resonant cavity antennas using different highly-reflective frequency selective surfaces as the superstrates[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010. Toronto:IEEE, 2010:1-4.
- [9] Foroozesh A,Shafai L. Investigation into the application of artificial magnetic conductors to bandwidth broadening, gain enhancement and beam shaping of low profile and conventional monopole antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011,59(1):4-20.
- [10] 刘强,杨阳,黄卡玛.大功率微波下超材料的设计和应用[J].太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):245-249. (LIU Qiang,YANG Yang,HUANG Kama. Design and applications of metamaterials with high power microwave[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):245-249.)
- [11] Trentini G V. Partially reflecting sheet arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation Ire, 1956,4(4):666-671.

作者简介:



左 腾(1990-),男,陕西省安康市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为电磁场与微波 技术.email:zuootengg@hotmail.com. 谭非菲(1989-),女,四川省绵阳市人,在 读博士研究生,主要研究方向为电磁场与微波 技术.

陈 星(1970-),男,四川省巴中市人,博 士生导师,教授,主要研究方向为电磁场与微 波技术.