

文章编号: 2095-4980(2018)03-0486-04

基于多层介质覆盖层的高增益 Fabry-Perot 天线设计

刘士杰, 陈 星

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 提出一种由不同厚度和不同面积的多层介质板叠加制作多层介质覆盖层, 代替传统单层介质覆盖层, 提高 Fabry-Perot (F-P) 谐振腔天线增益和口径效率的设计方法。以工作频点 5.8 GHz 的 F-P 谐振腔天线设计为例, 采用微带贴片天线作为馈源, 由多层厚度分别为 1 mm, 1 mm 和 1.5 mm, 直径分别为 160 mm, 130 mm 和 120 mm, 相对介电常数为 16 的聚四氟乙烯介质板叠加制作该天线覆盖层。天线样品的测试结果与设计仿真结果吻合良好。与传统单层介质覆盖层相比, 该多层介质覆盖层将工作频率 5.8 GHz 处天线增益由 18.2 dBi 提高到 19.1 dBi, 相应口径效率由 70.02% 增加到 86.14%, 天线 $|S_{11}| < -10$ dB 阻抗带宽和 3 dB 增益带宽略有提高, 分别达到 8.19% 和 11.90%。

关键词: 介质覆盖层; F-P 谐振腔天线; 增益; 口径效率

中图分类号: TN828.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0486

Design of a high gain Fabry-Perot resonant antenna by using a multi-layer dielectric superstrate

LIU Shijie, CHEN Xing

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: A novel Fabry-Perot Resonant Antenna (FPRA) is proposed, which utilizes a multi-layer dielectric superstrate to enhance its gain and aperture efficiency. This multilayer superstrate is fabricated by assembling several dielectric plates with different thicknesses and areas. This FPRA works at 5.8 GHz, employs a patch antenna as its feed, and assembles three Teflon plates with different thicknesses (1 mm, 1 mm and 1.5 mm) and diameters (160 mm, 130 mm and 120 mm) but a same relative permittivity of 16 to be its superstrate. A prototype is fabricated and measured. The measurement results agree well with the simulation ones, and show, in comparison with the commonly adopted single-layer superstrate, the proposed multi-layer superstrate improves the F-P resonant antenna's gain from 18.2 dBi to 19.1 dBi at 5.8 GHz, correspondingly enhances the aperture efficiency from 70.02% to 86.14%, additionally, slightly increases the antenna's $|S_{11}| < -10$ dB impedance bandwidth and 3 dB gain bandwidth, which are 8.19% and 11.90% respectively.

Keywords: dielectric superstrate; Fabry-Perot Resonant Antenna; gain; aperture efficiency

高增益天线有着广泛的应用, 一直是众多学者研究的重点, 主要包含微带贴片天线阵列、抛物面天线、波导缝隙阵列天线、谐振腔天线等等。以微带阵列天线为例, 微带天线具有低剖面、低成本、易加工等特点, 但是单个微带贴片的增益通常不高。为实现较高的增益, 一般使用多个贴片天线作为单元组成天线阵列。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, 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。

法布里-珀罗 (F-P) 谐振腔天线是一种应用广泛的高增益天线。在初级馈源天线上方加载覆盖层即可实现高增益。通过覆盖层的部分反射特性, 以及恰当设计的距离 H , 初级馈源辐射的电磁能量在覆盖层和反射地之间多次反射, 最后在天线口径面上形成同相分布的口径场, 电磁波同相叠加, 可以显著地提高其辐射效率, 进而实现高增益^[1-2]。目前, 绝大多数 F-P 谐振腔天线采用单层覆盖层, 如频率选择表面、电磁带隙结构和零折射率材料等等^[3-5]。因为口径面场分布不均匀等原因, F-P 谐振腔天线尽管易实现高增益, 但其口径效率却较低。例如, GUÉRIN

等^[6]利用正方形缝隙作为覆盖层的周期单元设计了一款 F-P 谐振腔天线, 实现了 27.8 dBi 的增益, 但是其口径效率仅为 40%; 郑洽等人^[7]也曾研究过加载介质覆盖层的 F-P 谐振腔天线, 但是其文中设计的 F-P 谐振腔天线的口径效率只有 59.99%。有学者^[8]分析指出, 当 F-P 谐振腔天线尺寸超过 $2\lambda \times 2\lambda$ (λ 为工作波长), 天线口径效率不超过 75%。

本文提出使用不同厚度和不同面积的多层介质板叠加制作多层介质覆盖层, 代替传统的单层介质覆盖层, 由于改变介质覆盖层的大小和厚度, 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。本文分别仿真了单层 3.5 mm 厚介质覆盖层 F-P 谐振腔天线和多层 3.5 mm 厚介质覆盖层 F-P 谐振腔天线, 并对仿真结果进行了对比。证明采用的多层介质覆盖层可以提升天线增益及口径效率。

1 天线结构和设计

对 F-P 谐振腔天线, 口径场分布不均匀对天线增益和口径效率造成很大限制。为实现高口径效率, 本文设计了如图 1 所示的多层介质覆盖层。多层介质板叠加形成的不同覆盖层厚度使覆盖层具有非均匀反射系数幅值分布, 可修正 F-P 谐振腔天线的非均匀口径场分布, 从而提高天线增益和口径效率。

为使 F-P 谐振腔天线口径场幅值分布更均匀, 介质覆盖层采用多层不同厚度不同面积的非均匀设计。经过遗传算法优化后的多层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线结构如图 1 所示。该天线工作在 5.8 GHz, 辐射贴片长 19.5 mm, 宽 14.2 mm, 采用相对介电常数 2.65, 厚度 $H_{sub}=2$ mm 高频 PCB 板制作, 天线地板直径 160 mm。介质覆盖层为相对介电常数为 16 的聚四氟乙烯板, 其厚度分为 3 级, 第 1 级厚 $h_1=1$ mm, 直径 160 mm; 第 2 级厚 $h_2=1$ mm, 直径 130 mm; 第 3 级厚 $h_3=1.5$ mm, 直径 120 mm。

F-P 谐振腔天线的增益与覆盖层的反射系数幅值密切相关, 在此对介质板覆盖层反射系数的求解进行理论分析。假设电磁波由馈源天线辐射出后垂直入射到介质覆盖层, 由于介质波阻抗与空气波阻抗不同, 入射波必然会被分解为反射波和透射波 2 部分。所以单层介质覆盖层的反射和透射特性可以等效为传输线模型。介质板上层为自由空间, 波阻抗为 Z_0 , 自由空间波长为 λ , 介质板下层是电磁波入射方向, 波阻抗同样为 Z_0 , 而介质板覆盖层厚 h_1 , 相对介电常数为 ϵ_r 。所以从馈源天线看过去的等效阻抗 Z' 为:

$$Z' = Z_1 \frac{Z_0 + jZ_1 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} h_1\right)}{Z_1 + jZ_0 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} h_1\right)} \tag{1}$$

式中: λ_g 为介质波长; Z_1 为介质板覆盖层波阻抗。

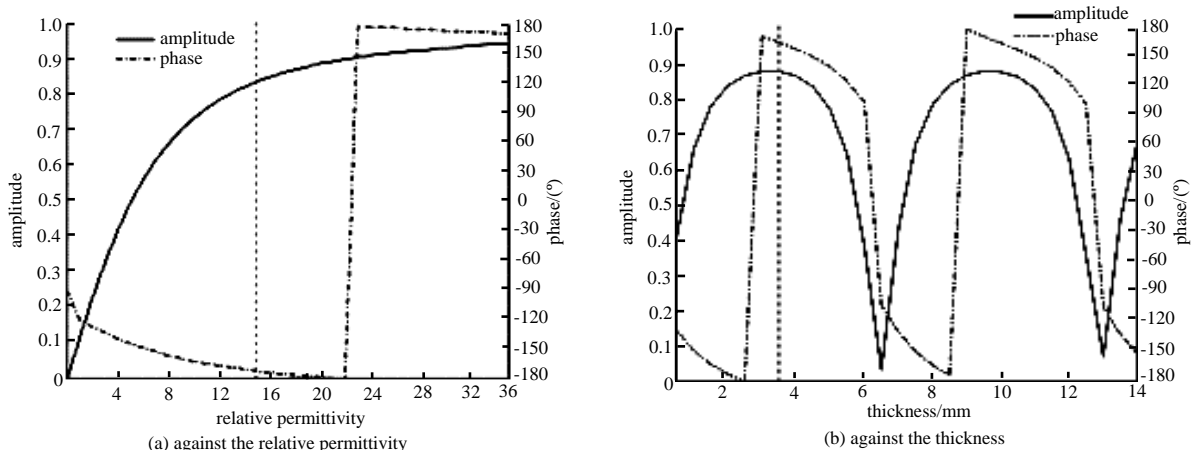


Fig.2 Performances of the reflection coefficient($\epsilon_r=16$)
图 2 反射系数的影响(a) 相对介电常数 (b) 厚度($\epsilon_r=16$)

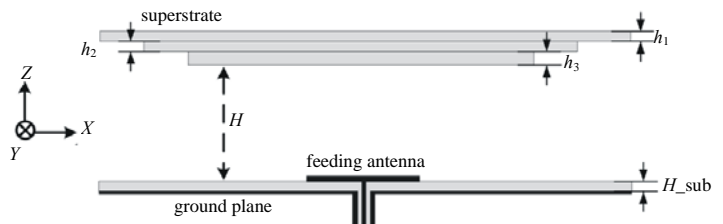


Fig.1 Side view of the F-P resonant antenna
图 1 F-P 谐振腔天线侧视图

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}, Z_1 = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

由此可得电磁波垂直入射至介质覆盖层下表面的反射系数幅值为:

$$|\Gamma| = \frac{Z' - Z_0}{Z' + Z_0} \quad (3)$$

由式(1)~(3)知,覆盖层的反射系数幅值与介质板的相对介电常数和厚度密切相关。如图 2(a)所示,在覆盖层介质板厚度保持 2 mm 不变时,反射系数幅值随相对介电常数的增大而增大。覆盖层反射系数幅值与介质板厚度的关系如图 2(b)所示,当介质板厚度为四分之一介质波长时,具有最高的反射系数幅值。



Fig.3 The prototype
图 3 加工的实物

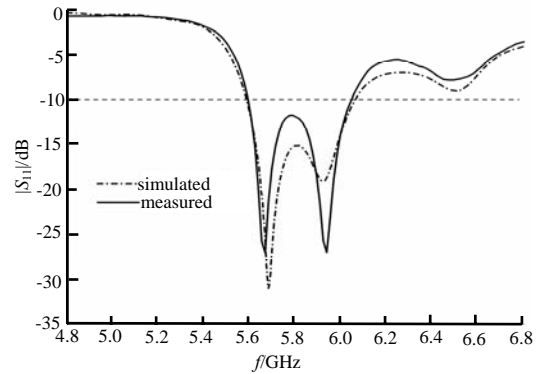


Fig.4 Simulated and measured $|S_{11}|$ patterns
图 4 仿真和实测的 $|S_{11}|$ 曲线

为尽可能提高增益,应该选取反射系数幅值较高的介质板作为覆盖层。所以,为使增益达到最优的同时又控制成本,本文最后采用了相对介电常数为 16 的介质板作为 F-P 谐振腔天线的覆盖层,如图 2(b)知,当介质板覆盖层为 3.5 mm 厚(在 5.8 GHz 处约为四分之一介质波长)时反射系数幅值为 0.88, 2 mm 厚时反射系数幅值为 0.84, 1 mm 厚时反射系数幅值为 0.65,形成了非均匀分布的反射系数幅值,可修正非均匀分布的口径场,从而提高天线增益和口径效率。

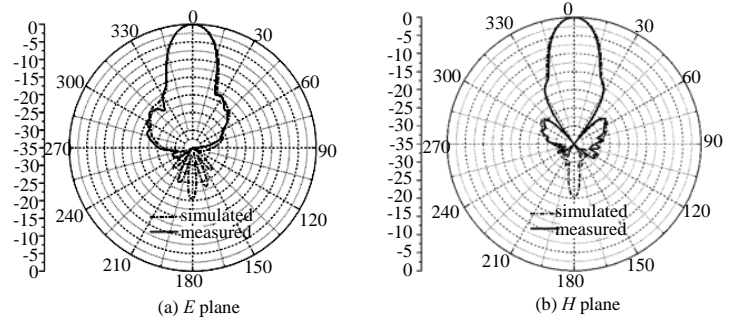


Fig.5 Simulated and measured directivity patterns
图 5 仿真和实测方向图

2 测试与分析

对设计的多层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线进行了加工和测试。天线实物如图 3 所示。图 4 和图 5 给出了仿真和测试的 $|S_{11}|$ 曲线和方向图。仿真和测试结果吻合良好,其中 $|S_{11}| < -10$ dB 阻抗带宽为 8.19% (5.584~6.059 GHz), 3 dB 增益带宽为 11.90% (5.461~6.152 GHz), 5.8 GHz 的方向性系数为 19.1 dBi, 相应的口径效率达到 86.14%。

在口径尺寸、辐射贴片等结构保持不变时, 3.5 mm 厚的相对介电常数为 16 的单层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线在 5.8 GHz 处的仿真增益为 18.2 dBi, 口径效率仅为 70.02%, 阻抗带宽为 7.55%, 3 dB 增益带宽为 11.21%。由此可见,多层介质覆盖层设计提高了单层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线的增益和口径效率。

图 6 为多层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线和单层介质覆盖

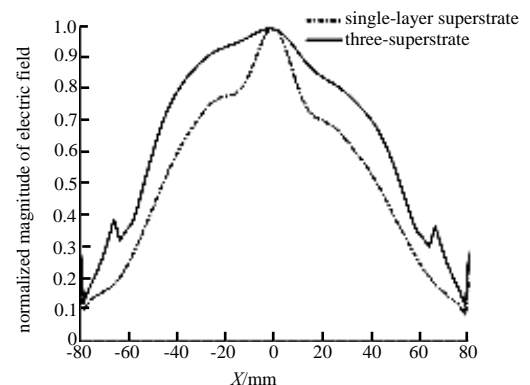


Fig.6 Normalized magnitude of electric field
图 6 电场幅值归一化分布

层 F-P 谐振腔天线在 $Y=0$ 处的随 X 位置变化(-80~80 mm)的口径面电场幅值归一化分布。对比发现,该多层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线较单层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线,具有更均匀的口径面电场幅值分布。说明修正 F-P 谐振腔天线的非均匀口径场分布可以提高天线增益。

3 结论

本文首先提出了“多层介质覆盖层”的全新设计,然后对介质板覆盖层进行了分析。设计了多层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线,对天线样品的仿真和测试表明,多层介质覆盖层将单层介质覆盖层 F-P 谐振腔天线的口径效率从 70.02% 提高到 86.14%, 相对提高了 23.02%, 阻抗带宽从 7.55% 提高到 8.19%, 3 dB 增益带宽从 11.21% 提高到 11.90%。因此本文研究证明,使用高介电常数均匀介质板作为 F-P 谐振腔天线覆盖层可以实现较高的口径效率,并且采用恰当的不同厚度、不同口径面的多层介质板覆盖层结构,可以在一定程度上继续提升 F-P 谐振腔天线的口径效率,同时天线其他性能基本不变。

参考文献:

- [1] TRENTINI G V. Partially reflecting sheet arrays [J]. *Ire Transactions on Antennas & Propagation*, 1956,4(4):666-671.
- [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)*. Toronto:IEEE, 2010:1-4.
- [3] FERESIDIS A P, VARDAXOGLU J C. A broadband high-gain resonant cavity antenna with single feed[C]// *First European Conference on Antennas and Propagation*. Nice, France:[s.n.], 2006:1-5.
- [4] LIU Z G, ZHANG W X, FU D L. Broadband Fabry-Perot resonator printed antennas using FSS superstrate with dissimilar size[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008,50(6):1623-1627.
- [5] WANG N, TALBI L, ZENG Qingsheng, et al. Wideband high gain 1-D EBG resonator antenna[C]// *IEEE International Wireless Symposium(IWS)*. [S.l.]:IEEE, 2013:1-4.
- [6] GUÉRIN N, ENOCH S, TAYEB G, et al. A metallic Fabry-Perot directive antenna[J]. *Antennas and Propagation*, 2006,54(1):220-224.
- [7] 郑治, 陈星, 徐光辉, 等. 介质覆盖层对微带天线带宽的展宽作用[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2016,53(2):326-330. (ZHENG Zhi, CHEN Xing, XU Guanghui, et al. Broaden bandwidth of the microstrip antenna by using a dielectric superstrate[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2016,53(2):326-330.)
- [8] LU Y F, LIN Y C. A hybrid approach for finite-size Fabry-perot antenna design with fast and accurate estimation on directivity and aperture efficiency[J]. *Antennas and Propagation*, 2013,61(11):5395-5401.

作者简介:



刘士杰(1991-), 男, 内蒙古自治区赤峰市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术。email:shijiel@yeah.net.

陈星(1970-), 男, 四川省巴中市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术。