

文章编号: 2095-4980(2018)01-0115-05

## 基于非均匀设计的高口径效率 Fabry-Perot 谐振腔天线

文 鸿, 陈 星

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** Fabry-Perot(F-P)谐振腔天线通常易实现高增益,但由于口径场非均匀的电磁场分布,使得其在大口径尺寸下的口径效率较低。本文设计了一种新型的F-P谐振腔天线,该天线采用非均匀特异媒质覆盖层实现口径场等幅分布,并通过非均匀特异媒质反射地实现口径场同相分布,从而提升F-P谐振腔天线在大口径尺寸下的口径效率。基于射线追踪法,推导了非均匀覆盖层和非均匀反射地的设计公式。本文设计、加工并测试了一款口径尺寸为 $5.18\lambda$ ( $\lambda$ 为自由空间波长)的圆形F-P谐振腔天线。仿真和测试结果吻合良好,  $|S_{11}| < -10$  dB的阻抗带宽为4.14%(5.740~5.980 GHz);在工作频点5.8 GHz处,该新型F-P谐振腔天线的增益为23.8 dBi,与传统F-P谐振腔天线相比,其口径效率从78.9%提高到90.5%。

**关键词:** 口径效率; F-P 谐振腔天线; 非均匀特异媒质覆盖层; 非均匀特异媒质反射地

**中图分类号:** TN828

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201801.0115

## A novel Fabry-Perot resonant antenna with high aperture efficiency based on non-uniform design

WEN Hong, CHEN Xing

(School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** Due to the non-uniform Electromagnetic(EM) field distribution over the superstrate, the Fabry-Perot Resonant Antenna(FPRA) is normally with high directivity but relatively low aperture efficiency when its aperture size is electrically large. A novel FPRA is proposed, both of whose superstrate and ground are designed to be non-uniform metamaterial, so as to realize the equal amplitude and cophasal distributions respectively for its aperture electromagnetic field, and thus enhance its aperture efficiency when its aperture size is electrically large. Based on the ray-tracing method, a set of formula for designing the non-uniform superstrate and ground are deduced. As a sample, a cylindrical FPRA with an aperture diameter of  $5.18\lambda$  ( $\lambda$  is the free space wavelength) is designed, fabricated and measured. Measured results agree well with simulated ones. It possesses an impedance bandwidth of 4.14%(5.740–5.980 GHz) when  $|S_{11}| < -10$  dB. At working frequency of 5.8 GHz, its directivity is 23.8 dBi. In comparison with a conventional FPRA with uniform superstrate and ground, the proposed FPRA increases the aperture efficiency from 78.9% to 90.5%.

**Keywords:** aperture efficiency; Fabry-Perot Resonant Antenna; Non-uniform Metamaterial Inspired Superstrate; Non-uniform Metamaterial Inspired Ground

F-P 谐振腔天线是一种应用广泛的高增益天线,其基本结构由初级馈源、覆盖层和反射地组成。通过覆盖层的部分反射特性,以及恰当地设计距离  $H$ ,初级馈源辐射的电磁能量在覆盖层和反射地之间多次迭代反射,并在覆盖层表面形成同相分布口径场,从而实现高增益定向辐射<sup>[1-4]</sup>。

大多数 F-P 谐振腔天线采用均匀介质或特异媒质覆盖层,口径场幅度为高斯分布<sup>[5]</sup>。根据天线原理,非均匀口径场分布将制约天线增益和口径效率。在文献[6-8]中,谐振腔天线的口径效率仅为 40%~60%。已有研究<sup>[9]</sup>指出,当 F-P 谐振腔天线口径尺寸大于  $2\lambda \times 2\lambda$  ( $\lambda$  为自由空间波长),其口径效率不超过 75%。

非均匀覆盖层可实现 F-P 谐振腔天线的口径场等幅分布,但覆盖层反射系数幅度和相位密切相关,非均匀覆

盖层难以避免地会破坏口径场的同相分布。针对此难题,本文设计了一款新型 F-P 谐振腔天线,分别采用非均匀特异媒质覆盖层和非均匀特异媒质反射地来实现口径场的等幅和同相分布。并以射线追踪法为基础,推导了设计公式。

## 1 高口径效率 F-P 谐振腔天线设计

### 1.1 “等幅”设计

为实现 F-P 谐振腔天线等幅分布口径场,采用 PCB 板制作的特异媒质覆盖层进行非均匀设计。单元反射系数幅值不再是一个固定值  $R$ ,而是随空间位置变化的函数。图 1 中的  $R_N$  为经过  $N$  次反射后最终辐射到空间中去的  $Ray_N$  经由覆盖层时所处位置的反射系数幅值。覆盖层特异媒质单元的幅值设计推导过程如下。

令点源  $P$  辐射的电场幅值为  $E_p$ ,辐射角为  $\theta$ 。 $Ray_0$  的电场幅值为  $E_p \cdot T_0$ ,  $Ray_1$  的电场幅值为  $E_p \cdot R_0 \cdot T_1$ ,  $Ray_2$  的电场幅值为  $E_p \cdot R_0 \cdot R_1 \cdot T_2$ ,以此类推,可得  $Ray_N$  的电场幅值为:

$$E_N = E_p \cdot \left( \prod_{M=0}^{N-1} R_M \right) \cdot T_N \quad (1)$$

式中  $T_N$  是与  $R_N$  相对应的透射系数幅值,它们满足:

$$R_N^2 + T_N^2 = 1 \quad (2)$$

若口径面上电场成等幅分布,则任意相邻两射线  $Ray_{N+1}$  与  $Ray_N$  有相等的电场幅值,即:

$$E_{N+1} = E_N \quad (3)$$

将式(1)和(2)带入式(3),即可得到非均匀特异媒质覆盖层的设计公式:

$$R_{N+1} = \sqrt{\frac{2R_N^2 - 1}{R_N^2}} \quad (4)$$

### 1.2 “同相”设计

为实现同相口径场分布,采用 PCB 板制作的特异媒质反射地代替传统金属地。特异媒质反射地的背面为金属面,因此其反射系数幅值为 1,故不影响口径场的等幅分布。将反射地中心设为零相位点,  $\phi_G$  为反射地特异媒质单元的相位,  $\phi_T, \phi_R$  分别为覆盖层特异媒质单元的透射系数和反射系数相位。反射地特异媒质单元的相位设计推导过程如下。

从图 1 可以得到任意相邻两射线  $Ray_{N+1}$  与  $Ray_N$  之间的相位差为:

$$\phi_{N+1} = \phi_{RN} + \phi_{G(N+1)} + \phi_{T(N+1)} - \phi_{TN} - \frac{K \cdot 2h}{\cos \theta} + K \cdot 2h \tan \theta \sin \theta \quad (5)$$

式中  $K$  是波数。“同相”条件为任何  $N$  满足:

$$\phi_{N+1} = 2n\pi \quad (6)$$

式中  $n$  为整数,将式(6)带入式(5),可以得到非均匀特异媒质接地层的设计公式:

$$\phi_{G(N+1)} = \frac{4\pi H \cos \theta}{\lambda} + \phi_{TN} - \phi_{T(N+1)} - \phi_{RN} + 2n\pi \quad (7)$$

## 2 设计举例

设计的 F-P 谐振腔天线工作频率为 5.8 GHz,其圆形特异媒质覆盖层和反射地的直径为 268 mm,即  $5.18 \lambda$ ,

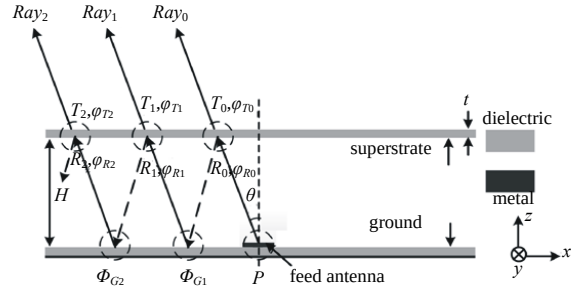
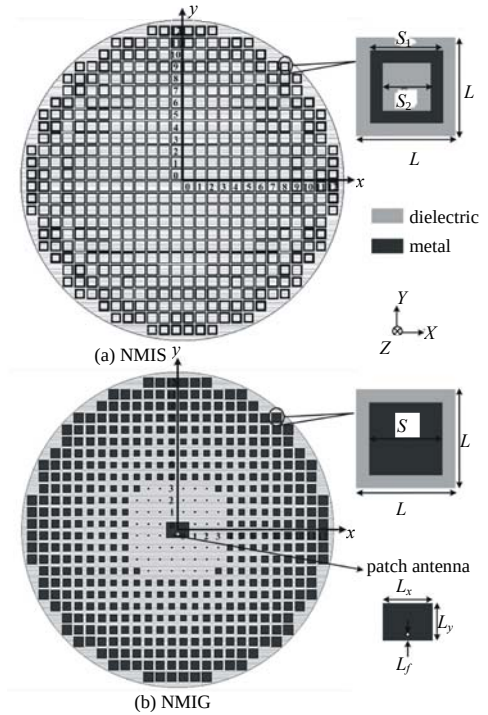


Fig.1 Configuration of a FPRA  
图 1 F-P 谐振腔天线结构示意图



(b) NMIG  
Fig.2 Configuration of FPRA with NMIS(a) and NMIG(b)  
图 2 覆盖层(a)和反射地(b)的特异媒质单元结构示意图

[illegible]

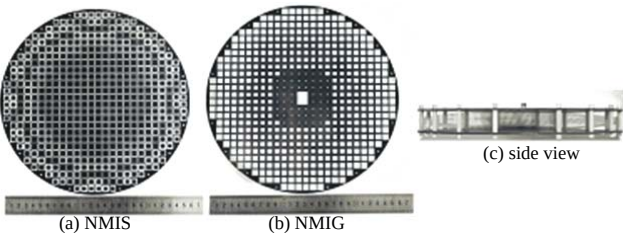


Fig.4 Photographs of the FPRA with NMIS and NMIG  
图 4 非均匀 F-P 谐振腔天线照片

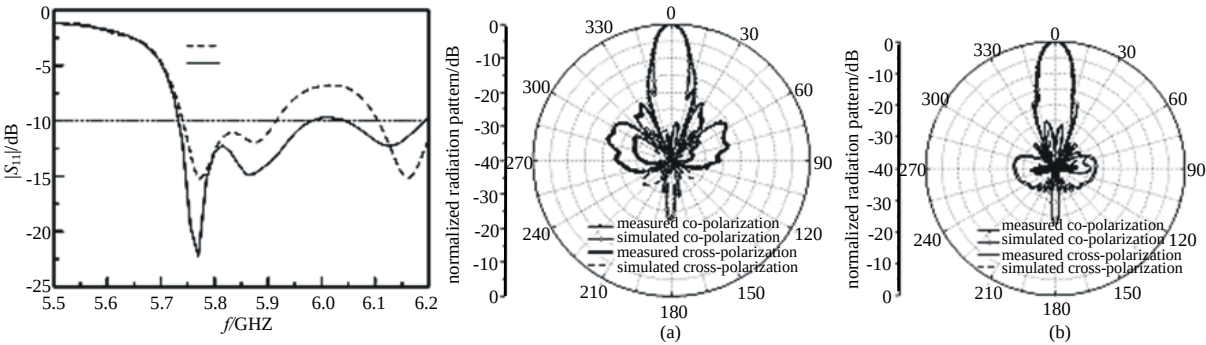


Fig.5 Input reflection coefficients of the experimental FPRA, measured and simulated radiation patterns at 5.8 GHz in (a) *E*-Plane and (b) *H*-Plane  
图 5 仿真和实测的 $|S_{11}|$ 曲线, (a) *E* 面、(b) *H* 面归一化方向图

表 2 均匀与非均匀 F-P 谐振腔天线的性能对比  
Table2 Comparison of directivity and aperture efficiency

|             | reflection coefficient amplitude | directivity/dBi | aperture efficiency/% |
|-------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------|
| uniform     | 0.930                            | 22.1            | 61.2                  |
|             | 0.960                            | 22.7            | 70.3                  |
|             | 0.970                            | 22.9            | 73.6                  |
|             | 0.980                            | 23.1            | 77.1                  |
|             | 0.990                            | 23.2            | 78.9                  |
|             | 0.995                            | 22.9            | 73.6                  |
| non-uniform | /                                | 23.8            | 90.5                  |

4 结论

为提高 F-P 谐振腔天线的增益和口径效率, 本文提出了“非均匀特异媒质覆盖层实现等幅口径场分布, 非均匀特异媒质接地层实现同相口径场分布”的全新设计, 并推导了设计公式。对天线样品的仿真和测试表明, 本文非均匀设计将传统均匀设计 F-P 谐振腔天线的口径效率从 78.9% 提高到 90.5%, 为高增益和高口径效率 F-P 谐振腔天线的设计提供了一种全新的有效方法。

参考文献:

[ 1 ] TRENTINI G V. Partially reflecting sheet arrays[J]. Ire Transactions on Antennas & Propagation, 2003,4(4):666–671.

[ 2 ] ATTIA H,YOUSEFI L,RAHAHI O. High-gain patch antennas loaded with high characteristic impedance superstrates[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2011,10(10):858–861.

[ 3 ] THÈVENOT M,DENIS M S,REINEIX A,et al. Design of a new photonic cover to increase antenna directivity[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015,22(2):136–139.

[ 4 ] 左腾,谭菲菲,陈星. 使用非均匀特异媒质覆盖层的高增益谐振腔天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(4): 601–604. (ZUO Teng,TAN Feifei,CHEN Xing. High gain resonant cavity antenna using non-uniform metamaterial inspired superstrate[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(4):601–604.

[ 5 ] JOHNSON R C,JASIK H. Antenna engineering handbook[Z]. 2nd ed. 1984.

[ 6 ] GUERIN N,ENOCH S,TAYEB G,et al. A metallic Fabry–Perot directive antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2006,54(1):220–224.