

双波段共享孔径天线 Fabry-Perot 谐振腔的设计

葛悦禾^{1,2}, 张海¹

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 通过对频率选择表面的分析,提出一种用于设计部分反射表面(PRS)的方法.该方法可使所设计 PRS 结构的反射相位在设计频率处产生跃变,并使 PRS 结构与金属地面构成的 Fabry-Perot 谐振腔在该 PRS 谐振频率两端产生两个新的谐振频率,从而实现双波段共享孔径 Fabry-Perot 谐振天线.设计实例的测试结果表明:当工作频率为 11.5、13.2 GHz 时,其峰值增益分别为 16.2、15.98 dBi,工作带宽分别为 5.5%、3.2%.

关键词: Fabry-Perot 谐振天线;电磁带隙;漏波天线;共享孔径;频率选择表面;部分反射表面

中图分类号: TN 822.6 **文献标志码:** A

相对于反射面天线和阵列天线等传统的定向高增益天线,Fabry-Perot 谐振天线具有结构简单、造价低、易于加工和集成等特点^[1-2].随着对电磁带隙(EBG)结构和部分反射表面(PRS)结构的深入研究,双波段 Fabry-Perot 谐振天线的设计成为了可能.该天线的主要特点体现在 Fabry-Perot 谐振腔的双谐振设计上,通常都是通过对构成谐振腔的 EBG 结构的特殊设计,使谐振腔产生双谐振.例如文献[3]中的三层介质圆柱构成的 EBG 结构和文献[4]中在单层介质层两面覆以两个金属振子阵构成的 EBG 结构,都可以使它们与金属地面构成的 Fabry-Perot 谐振腔产生双谐振,进而构成双频段 Fabry-Perot 谐振天线.文献[5-6]采用地面由频率选择表面(FSS)结构而非金属板构成,使地面反射相位产生突跃,从而构成的谐振腔产生双谐振.本文提出了一种新的双波段 Fabry-Perot 谐振器的设计方法,用于实现双波段高增益共享孔径 Fabry-Perot 谐振天线.

1 双波段 Fabry-Perot 天线设计原理

周期结构 PRS 的反射幅度和相位会在其谐振频率附近剧烈变化,这一现象可以被用来设计宽带 Fabry-Perot 谐振天线^[7-9].如果该 PRS 上的谐振强度达到一定程度,即相应的相位跃变增大到一定程度,就可以实现双波段共享孔径 Fabry-Perot 谐振天线的设计.文中设计的 Fabry-Perot 谐振天线采用如图 1 的结构,该天线由金属地板、基于频率选择表面的 PRS 和馈电小天线构成.由图 1 可见:PRS 由一个单层介质板和在其两面覆以同样的正方形金属贴片阵构成,PRS 和金属地面构成了一个腔体.根据文献[7]可知,该腔体在设计频率点应满足谐振条件,即设计频率 f ,腔体高度 h ,以及 PRS 与接地板的反射相位 ϕ_P, ϕ_G 满足

$$\phi_P + \phi_G - \frac{2\pi}{\lambda}2h = 2k\pi, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots.$$

(1)

由于 PRS 表面的漏波与天线法向同相,即会在天线法向产生高方向性,因此有望形成高增益天线.Fabry-Perot 谐振天线的增益主要由 PRS 的横截面尺寸、PRS 的反

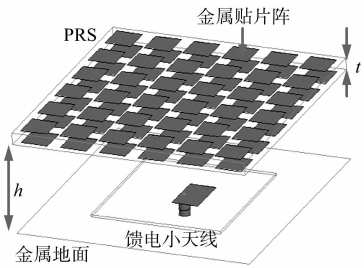


图 1 双波段 Fabry-Perot 谐振天线结构
Fig. 1 Configuration of dual-band Fabry-Perot resonator antenna

射系数、谐振腔高度和馈电天线等因素决定,而要想获得高增益,需要具有强反射的 PRS.

PRS 和金属地板的尺寸相对馈电小天线及天线的工作波长来说足够大,故在分析谐振腔时可视为无限大并忽略馈电小天线的影响. 在研究这样的天线时,应先用电磁场镜像原理移去金属地板. 理论分析表明:由 PRS 和其镜像所构成谐振腔的谐振频率等于由 PRS 和原金属地面所构成谐振腔的谐振频率. 由于 PRS 和金属地面均可视为周期结构,因此可采用周期边界条件对 PRS 的特性进行分析,即可以转化为对其一个周期单元的特性分析;而对其构成的 Fabry-Perot 谐振腔的分析也可以转化为对由一个周期单元和其镜像构成的谐振腔的分析. 这样的分析可以大幅降低计算时间. 图 2(a)为采用周期边界条件的 PRS 一个周期单元,该单元由一个正方形的薄介质板和蚀刻在两边的同样尺寸的正方形金属贴片构成. 图 2(b)为 PRS 的一个周期单元和其镜像所构成的谐振腔,该腔体四周围绕着 4 个周期边界.

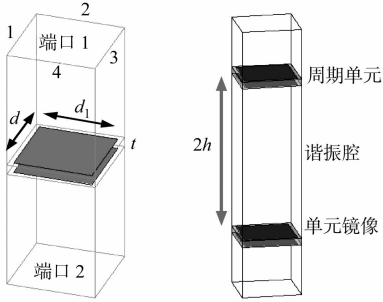
图 2 中周期单元的介质板使用 FR4 材料,其相对介电常数为 4.4,厚度 t 为 0.7 mm, $d=6$ mm, $d_1=5.3$ mm. PRS 的反射特性可以通过图 2(a)的模型获得. 在端口 1 应用垂直平面波入射,计算所得反射系数的幅度和相位,如图 3 所示. 由图 3 可见:反射相位随着频率(f)的增加而下降,但在 12.2 GHz 附近,反射相位呈现快速跃变. 产生这一现象的原因在于:介质板两侧蚀刻了两个同样的周期金属贴片阵,该贴片阵列在频率 12.2 GHz 处产生强烈谐振,从而引起了反射幅度和相位的剧烈变化. 图 3 还给出了一个通常的、没有谐振的 PRS 反射相位的计算结果,表明该相位随着频率的增加而始终单调下降.

PRS 的反射相位将决定谐振条件能否满足. 从式(1)可得出使谐振条件持续满足的反射相位值,而图 3 也给出了这样的理想反射相位(ϕ_G). 由图 3 可见:该相位随着频率的增加而线性增加. 理想反射相位与设计的反射相位有 3 个交点,而设计的反射相位和通常的反射相位只有 1 个交点. 这意味着由通常的 PRS 构成的谐振腔只有 1 个谐振频率,而由设计的 PRS 组成的谐振腔却有 3 个谐振频率,即低谐振频率 $f_{low}=11.5$ GHz,设计的 PRS 谐振频率 $f_{res}=12.2$ GHz,高谐振频率 $f_{high}=13.2$ GHz. 在频率 f_{res} 上,PRS 的反射幅度几乎为零,说明入射波几乎无反射地全部通过. 此时, Fabry-Perot 谐振天线的有效口径很小,相对馈电天线来讲几乎没有增益产生. 因此,由设计的 PRS 构成的 Fabry-Perot 谐振天线只能在 f_{low} 和 f_{high} 两频率附近产生高增益.

该结论也可通过研究图 2(b)谐振腔模型内的电场分布得以验证. 由 PRS 的周期单元和它的镜像所构成的谐振腔,其谐振频率可以通过计算该谐振腔的传输系数获得,通过三维电磁场仿真软件得到的计算结果,如图 4 所示. 由图 4 可见:在 10~15 GHz 的范围内,存在 3 个谐振频率,分别与图 3 所示的结果对应相等.

谐振腔在 3 个频率点处的电场分布,如图 5 所示. 由图 5 可见:当频率分别等于 f_{low} 和 f_{high} 时,谐振腔内的电场主要分布于腔体的对称位置,而原先金属地面处的电场强度为零. 因此,这两个频率是由 PRS 和金属地面构成谐振腔的谐振频率. 当频率等于 f_{res} 时,原金属地面位置处的电场强度不为零,它不是 PRS 和金属地面构成谐振腔的谐振频率,所设计 PRS 构成的 Fabry-Perot 谐振天线只在 f_{low} 和 f_{high} 两频率形成高增益.

综上所述,如果一个 PRS 能够在某一频率(f_{res})上产生强谐振,那么由该 PRS 和金属地面构成的谐振腔会在 f_{res} 两边各产生一个谐振频率,相应的 Fabry-Perot 谐振天线在这两个频率上会产生高增



(a) 周期单元 (b) 谐振腔模型
图 2 PRS 的周期单元
及其谐振腔模型

Fig. 2 Unit cell of the PRS and
its resonant cavity formed

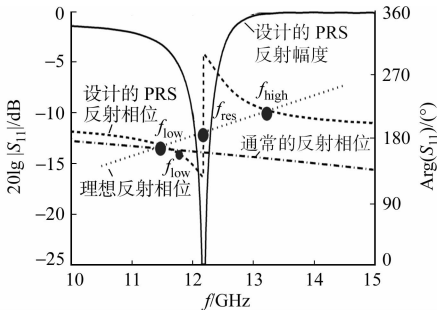


图 3 反射系数的幅度和相位

Fig. 3 Reflection magnitude and phase

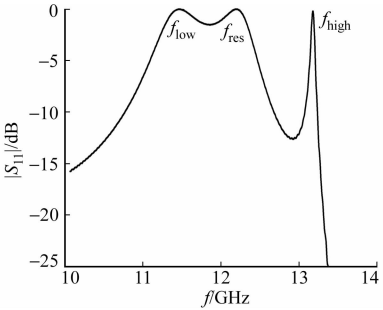


图 4 传输系数

Fig. 4 Transmission coefficient

益. 此外, 由式(1)可知, 如果改变谐振腔的高度 h , 其理想反射相位 (ϕ_G) 也将产生平移, 从而改变 f_{low} 和 f_{high} 的数值. 因此, 通过调节谐振腔的高度 h 可以适当改变所设计天线的两个谐振频率.

2 实验结果与分析

对上述所设计的 PRS 进行加工, 以构建双波段共享孔径 Fabry-Perot 谐振天线. 加工中, PRS 总尺寸为 $110\text{ mm} \times 110\text{ mm}$, 上面共覆有 18×18 个金属贴片对; PRS 置于一个 $295\text{ mm} \times 295\text{ mm}$ 的铝板上方 13.2 mm 处, 天线馈源采用微带贴片天线. 由于天线工作在两个波段, 因此采用两个不同的贴片天线分别馈电. 贴片天线的基片采用厚度为 0.7 mm 的 Rogers 5880 材料 ($\epsilon_r = 2.2$), 尺寸为 $36\text{ mm} \times 36\text{ mm}$. 该贴片天线置于铝板中心, 采用特性阻抗为 $50\ \Omega$ 的同轴电缆探针馈电. 由于这两个贴片天线工作在谐振腔内, 其设计要考虑谐振腔的影响^[8]. 经过优化的结果是, 在 11.5 GHz 的低频段, 印刷贴片大小为 $14.2\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 而工作于高频段的贴片尺寸为 $11.5\text{ mm} \times 6.8\text{ mm}$.

Fabry-Perot 谐振天线的输入阻抗由测量的输入反射系数 (S_{11}) 决定, 其测定结果如图 6 所示. 从图 6 可知: 低频段, 天线在 $S_{11} < -10\text{ dB}$ 的频带覆盖范围为 $11.29 \sim 11.93\text{ GHz}$, 输入阻抗带宽为 5.5% ; 而在高频段, 工作频段为 $13.03 \sim 13.45\text{ GHz}$, 带宽为 3.2% . 图 7 给出了天线增益的测量结果. 由图 7 可见: 其峰值增益分别为 16.2 dBi (对应 11.5 GHz) 和 15.98 dBi (对应 13.2 GHz).

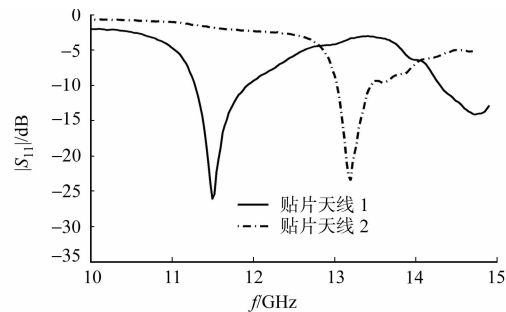


图 6 反射系数的测量结果

Fig. 6 Measured reflection coefficients

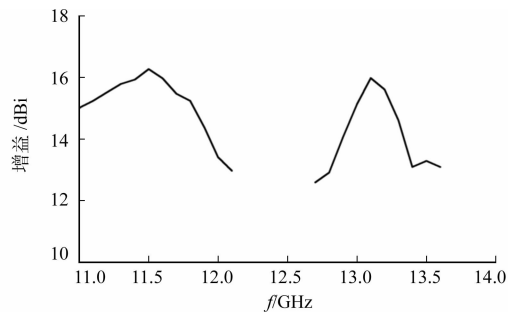
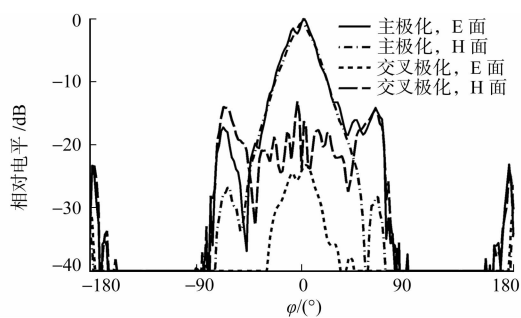


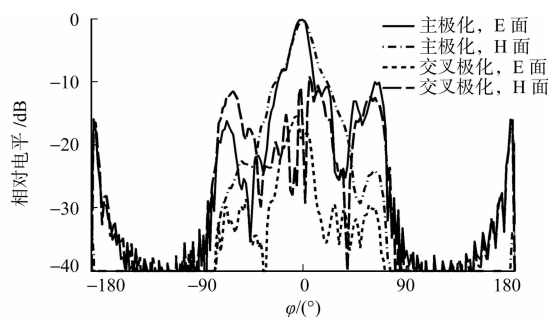
图 7 天线增益的测量结果

Fig. 7 Measured antenna gain

不同频率下天线方向图的测量结果, 如图 8 所示, 其中 φ 为角度. 由图 8 可知: 天线在 11.5 GHz 时的方向图较为理想, 第一副瓣电平和最大交叉极化电平分别为 -14 dB 和 -13 dB ; 而在 13.2 GHz 时的方向图相对较差, 第一副瓣电平和最大交叉极化电平分别为 -10 dB 和 -9 dB . 主要原因在于馈电天线



(a) $f = 11.6\text{ GHz}$



(b) $f = 13.2\text{ GHz}$

图 8 方向图的测量结果

Fig. 8 Measured radiation patterns

不理想, 其近场方向图和理想水平偶极子近场方向图相差较大. 在高频时更容易引起 PRS 表面相位失配, 产生方向图畸变. 解决方法是可以采用小天线阵 (如 2×2 的小微带天线阵) 进行馈电. 这样既可以得到较为理想的方向图, 又可以提高天线的增益.

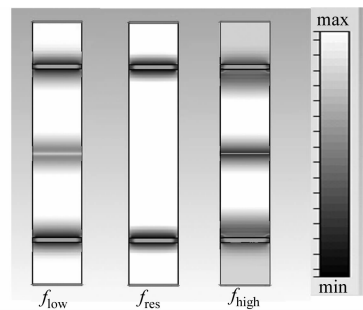


图 5 电场分布

Fig. 5 Electric field distribution

3 结论

通过对 PRS 上谐振单元的分析与研究,采用 FR4 介质板覆以等尺寸正方形金属贴片阵,可以使该 PRS 在设计频率处产生强谐振.由 PRS 和金属地面构成的 Fabry-Perot 谐振腔,会在该 PRS 谐振频率两端产生两个新的谐振频率,使得双波段共享孔径 Fabry-Perot 谐振天线的设计成为可能.设计实例的测量结果表明:当工作频率为 11.5 GHz 和 13.2 GHz 时,其峰值增益分别为 16.2 dBi 和 15.98 dBi,工作带宽分别为 5.5% 和 3.2%.

参考文献:

- [1] THEVENOT M, CHEYPE C, REINEIX A, et al. Directive photonic-bandgap antennas[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1999, 47(11): 2115-2122.
- [2] GE Yue-he, ESSELLE K P, HAO Yang. Design of low-profile high-gain EBG resonator antennas using a genetic algorithm[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2007, 6: 480-483.
- [3] LEE Y J, YEO J, MITTRA R, et al. Application of electromagnetic bandgap (EBG) superstrates with controllable defects for a class of patch antennas with spatial angular filters[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2005, 53(1): 224-235.
- [4] LEE D H, LEE Y J, YEO J, et al. Design of novel thin frequency selective surface superstrates for dual-band directivity enhancement[J]. Proc Inst Eng Tech, 2007, 1(1): 248-254.
- [5] RODES E, DIBLANC M, ARNAUD E, et al. Dual-band EBG resonator antenna using a single-layer FSS[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2007, 6: 368-371.
- [6] PIRHADI A, HAKKAK M, KESHMIRI F, et al. Design of compact dual band high directive electromagnetic bandgap (EBG) resonator antenna using artificial magnetic conductor[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2007, 55(6): 1682-1690.
- [7] FERESIDIS A P, VARDAXOGLU J C. High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces[J]. Proc Inst Elect Eng, 2001, 148(6): 345-350.
- [8] GE Yue-he, ESSELLE K P, BIRD T S. Design of wide-band, high-gain EBG resonator antennas using single-layer partially reflective surfaces[J]. IEEE Trans Antennas and Propag, 2012, 64(2): 743-750.
- [9] GE Yue-he, ESSELLE K P, BIRD T S. Designing a partially reflective surface with increasing reflection phase for wideband EBG resonator antennas[C]//Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society (AP-S) International Symposium. North Charleston: IEEE, 2009: 1-4.

Design of Fabry-Perot Cavity for Dual-Band Shared-Aperture Antennas

GE Yue-he^{1,2}, ZHANG Hai¹

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A method is proposed for the design of partially reflective surfaces (PRS) through the analysis and study on frequency selective surfaces. Using this method, the reflection phase of the designed partially reflective surface will have a sharp increase, resulting in two new resonant frequencies in the Fabry-Perot cavity formed by the PRS and the metallic ground, at the two sides of resonant frequency of the PRS, making it feasibility the dual-band shared-aperture Fabry-Perot resonator antenna. The measured results of the prototype show that the peak gains are 16.2 dBi and 15.98 dBi and the bandwidths are 5.5% and 3.2% working frequencies at 11.5 GHz and 13.2 GHz, respectively.

Keywords: Fabry-Perot resonator antennas; electromagnetic band-gap; leaky-wave antennas; shared-aperture; frequency-selective surfaces; partially reflective surfaces