

文章编号 1004-924X(2011)09-2043-07

叠加 Y 环单元频率选择表面的设计

陈 新*, 高劲松, 王岩松, 冯晓国, 梁凤超

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:对 Y 环单元进行改造得到了叠加 Y 环单元图形,以延迟频率选择表面(FSS)的高次谐振,实现无干扰的单通带滤波器。运用谱域法分析得到的叠加 Y 环单元,并与 Y 环单元进行对比,分别讨论其角度稳定性、极化稳定性、-3 dB 带宽和高次谐振点。分析表明:当中心频点同为 17.6 GHz 时,叠加 Y 环单元具有更窄的带宽,而高次谐波向后延迟 6.5 GHz,并保证了良好的极化稳定性和角度稳定性。叠加 Y 环单元臂长从 2.78 mm 增大到 3.18 mm 时,中心频率从 17.6 GHz 下降到 14.1 GHz;臂宽从 1.1 mm 增大到 1.5 mm 时,中心频率从 17.6 GHz 提高到 20.6 GHz,带宽变大;单元间距从 7.2 mm 增加到 8 mm 时,带宽从 4.5 GHz 减小到 3.5 GHz,中心频点不变;缝隙宽度增大时,带宽变大,中心频点升高。在微波暗室中对叠加 Y 环单元 FSS 进行测试,结果与预期一致。结果表明,叠加 Y 环单元在保证角度稳定性与极化稳定性前提下,能够延迟高次谐振点,为工作频段内实现单通带滤波器提供了新的思路。

关键词:频率选择表面(FSS);叠加 Y 环单元;高次谐波;极化稳定性;角度稳定性

中图分类号:TN957;TN713 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111909.2043

Design of overlapping Y loop element FSS

CHEN Xin*, GAO Jin-song, WANG Yan-song, FENG Xiao-guo, LIANG Feng-chao

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: chenxin_19344834@163.com

Abstract: An overlapping Y loop element Frequency Selective Surface(FSS) based on traditional Y loop elements was designed to delay the high harmonics of FSS in a working band and to achieve the single-pass band filter. By using the spectrum domain approach, the new element was analyzed and compared with the traditional Y loop elements. The affect of different incidence angles on the center frequency, -3 dB bandwidth and the limitation ability for the high harmonics under TE and TM incidence waves was discussed. The results show that the new element FSS owns the good stability under different incidence angles and polarizations. In the same resonant frequency of 17.6 GHz, the overlapping Y loop element possesses the narrower bandwidth than Y loop element, and its high harmonics delays for 6.5 GHz. When the length of the arm grows from 2.78 mm to 3.18 mm, the center frequency descends from 17.6 GHz to 14.1 GHz; When the width of the arm grows from 1.1 mm to

收稿日期:2010-09-25;修订日期:2011-01-29.

基金项目:武器装备探索研究资助项目(No. 7130920)

1.5 mm, the center frequency rises from 17.6 GHz to 20.6 GHz and the bandwidth is widened at the same time. Furthermore, when the space between the elements increases from 7.2 mm to 8 mm, the bandwidth narrows down from 4.5 GHz to 3.5 GHz with a stable center frequency. The overlapping Y loop element FSS was tested in a microwave darkroom. By comparing with a calculation, the measured curve is good agreement with the calculated one. Obtained results show that the overlapping Y loop element can delay high harmonics in good stability for incidence angles and polarizations and provides a new idea for achieving the single-pass band filter in the working band.

Key words: Frequency Selective Surface (FSS); overlapping Y loop element; high harmonics; polarization independence; angle independence

1 引言

频率选择表面 (Frequency Selective Surfaces, FSS) 是由周期性排列的金属贴片单元 (带阻型), 或由金属屏上周期性的开孔单元 (带通型) 构成的一种二维周期阵列结构^[1]。FSS 能够使电磁波在谐振频率处发生全反射或全透射, 因此已经广泛应用于微波、红外直至可见光波段, 特别是在实现飞行兵器雷达隐身方面, 是目前最佳选择方案^[2-3]。目前, 世界各国都十分重视对 FSS 的开发与应用, 因而近几十年来, FSS 无论是在理论还是在实验上都取得了极大的进展^[4-5]。

带通 FSS 隐身雷达罩的工作原理是将其谐振频率作为雷达的工作频率, 在此频率附近, 天线罩是透明的, 能够正常地发射和接收电磁波; 在通带外, 天线罩呈金属化, 用于降低雷达散射截面。在工程应用中, 需要考虑电磁波入射到雷达罩表面的极化方式和入射角度的不确定性, 因此 FSS 设计必须对不同入射角度和不同极化方式有稳定的频率响应特性^[6], 同时, 要保证工作频段内不产生多余的通带, 即延迟高次谐波的出现^[7]。

FSS 单元图形的种类很多, 如矩形、圆形、六边形、十字形、Y 形以及环形等。由于 FSS 在隐身领域里的重要应用, 国内外的学者对这些常见的单元图形进行了比较详细的设计与研究。评价某个 FSS 结构特性的主要指标包括: 中心频率、中心频点透过率和 -3 dB 带宽等。

在众多单元图形中, Y 环单元结构简单, 工艺精度高, 具有较好的极化稳定性和角度稳定性, 并且其三角形的排布方式, 更加适合于在常见的锥形雷达罩表面形成周期阵列, 因而 Y 环单元成为

最适合在实际工程当中使用的图形单元^[8-10]。本文运用谱域法将传统 Y 环单元 FSS 与叠加 Y 环单元 FSS 进行对比, 在保留传统 Y 环单元良好的极化稳定性和角度稳定性的基础上, 考察叠加 Y 环单元结构对通带内高次谐波的抑制情况, 同时分析了叠加 Y 环单元臂长、臂宽、缝宽以及排布方式等结构参数对 FSS 频率响应特性的影响, 并运用镀膜和光刻工艺制备出试验样件, 在微波暗室中进行测试, 得到的结果为叠加 Y 环单元 FSS 工程化应用提供了依据。

2 理论分析

利用谱域法对自由空间中无限大的孔径型 FSS 进行分析, 将 FSS 的入射场和散射场与其上的孔径感应磁流联系起来。利用电磁场中二重性原理, 在 X-Y 平面上先建立起一个周期单元的积分方程, 再根据 Floquet 定理, 得到整个周期阵列的积分方程。设 \mathbf{M} 为入射波在孔径上引起的感应磁流, 则一个单元上的 r 到 r' 的散射场表示为:

$$\mathbf{H}^s(x, y) = -j\omega\epsilon_0 \mathbf{F}(x, y) + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y)), \quad (1)$$

式(1)中,

$$\mathbf{F}(r) = \int \mathbf{G}(r, r') \mathbf{M}(r') dr' = \mathbf{G} * \mathbf{M}, \quad (2)$$

$$\mathbf{G}(r, r') = \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{4\pi|r-r'|}, \quad (3)$$

波数 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, \mathbf{G} 是自由空间的格林函数。磁场边界条件为:

$$\mathbf{H}_\tau = \mathbf{H}_\tau^s + \mathbf{H}_\tau^{\text{inc}} = 0, \quad (4)$$

其中 τ 表示切向磁场, s 和 inc 表示散射场和入射

场, 利用上式并应用傅里叶变换, 即得到 FSS 一个单元磁场积分方程的表达式:

$$-\begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x, y) \\ H_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \cdot \tilde{\mathbf{G}} \begin{bmatrix} \tilde{M}_x \\ \tilde{M}_y \end{bmatrix} e^{j(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad (5)$$

当 $k_0^2 > \alpha^2 + \beta^2$ 时,

$$\tilde{\mathbf{G}} = \frac{-j}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2 - \beta^2}} \mathbf{I}, \quad (6)$$

利用 Floquet 定理可得到 FSS 由入射波激励引起的感应磁流:

$$\mathbf{M}(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_m e^{j(2m\pi/a + k_x^{\text{inc}})x}, \quad (7)$$

$$\mathbf{M}(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_n e^{j(2n\pi/b + k_y^{\text{inc}})y}, \quad (8)$$

其中 a 和 b 分别表示 x 方向和 y 方向的周期。将式(6)、(7)、(8)代入到(5)中得:

$$-\begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x, y) \\ H_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 ab} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{nm}^2 & -\alpha_{nm}\beta_{nm} \\ -\alpha_{nm}\beta_{nm} & k_0^2 - \beta_{nm}^2 \end{bmatrix} \cdot \tilde{\mathbf{G}}(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \cdot \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix} \cdot e^{j(\alpha_{nm}x + \beta_{nm}y)}. \quad (9)$$

上式中,

$$\alpha_{nm} = \frac{2m\pi}{a} + k_x^{\text{inc}}, \quad (10)$$

$$\beta_{nm} = \frac{2n\pi}{b\sin\theta} - \frac{2m\pi}{a} \cot\theta + k_y^{\text{inc}}, \quad (11)$$

其中 θ 为 FSS 单元两个周期方向的夹角。用矩量法解方程(9), 即可得到等效磁流以及透射系数和反射系数。当有介质加载时, 只需将自由空间的格林函数 $\mathbf{G}(x, y)$ 换成介质加载时的格林函数即可^[11]。

3 模型设计与分析

本文在设计和分析 FSS 时, 所采用的模型为无限薄的理想导体, 即电导率无穷大, 并在尺寸无限大的理想导体表面排列 FSS 结构单元。

3.1 传统 Y 环单元与叠加 Y 环单元的结构设计

叠加 Y 环单元结构参数如图 1 所示: $W = 1.1 \text{ mm}, L = 2.78 \text{ mm}, \omega = 0.4 \text{ mm}, l = 2.4 \text{ mm}$,

单元图形沿横向和纵向无限延伸, 并且两个方向的周期相等, 即 $a = b = 7.2 \text{ mm}$, 中心频点 $f_0 = 17.6 \text{ GHz}$ 。与之对比, 设计传统 Y 环结构单元, 使其具有相同的中心频点。结构参数如图 2 所示: $W = 1.6 \text{ mm}, L = 3.4 \text{ mm}, \omega = 0.9 \text{ mm}, l = 3.05 \text{ mm}$ 。传统 Y 环单元采用正三角形排列, 即 $\theta = 60^\circ, a = b = 8 \text{ mm}$ 。

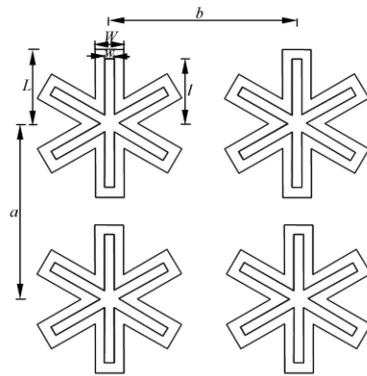


图 1 叠加 Y 环阵列参数

Fig. 1 Parameters of overlapping Y loop element array

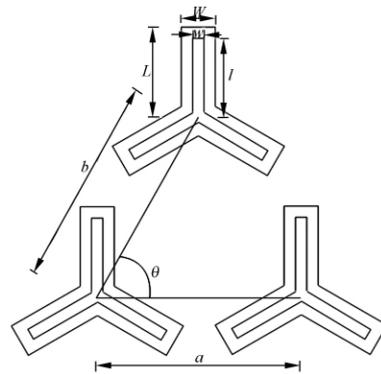


图 2 传统 Y 环阵列参数

Fig. 2 Parameters of traditional Y loop element array

3.2 对高次谐波的抑制情况

图 3 为在 TE 极化方式下, 当电磁波以 0° 入射时, 两种 FSS 结构的传输特性曲线。图中显示叠加 Y 环单元 FSS 与传统 Y 环单元 FSS 的中心频点均在 17.6 GHz , 叠加 Y 环-3 dB 带宽为 4.5 GHz , 传统 Y 环-3 dB 带宽为 5.8 GHz 。传统 Y 环结构在 29 GHz 处出现另一个通带峰值, 而叠加 Y 环结构使多余的通带向高频延迟了 6.5 GHz , 对高次谐波的抑制能力更强, 这为抑制工作频段内多余的通带提供了一种新的设计思路。

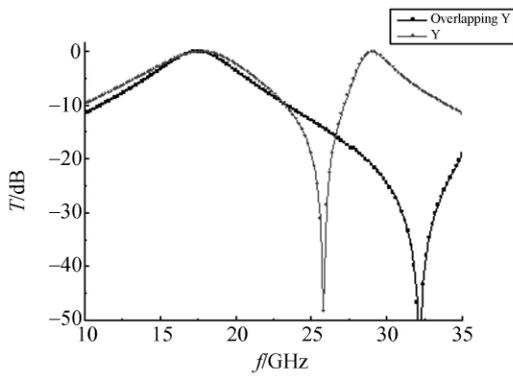


图 3 相同中心频点的叠加 Y 环单元与 Y 环单元 FSS 的频率响应

Fig. 3 Frequency responses of two kinds of element FSSs with the same center frequency

3.3 入射电磁波在相同极化方式下的角度稳定性

在实际的工程应用中,对 FSS 结构的角稳定性要求很高,因此需要考察叠加 Y 环单元在不同的入射角度情况下透过率的变化。图 4 为在 TE 极化方式下电磁波以 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 入射时的频率响应曲线。图示显示, 0° 和 30° 入射时,中心频点稳定在 17.6 GHz, 60° 入射时,中心频点为 17.4 GHz,从 0° 到 60° ,中心频点漂移 0.2 GHz,具有较好的角度稳定性,同时随着角度的增大, -3 dB 带宽从 4.5 GHz 减小到 2 GHz。

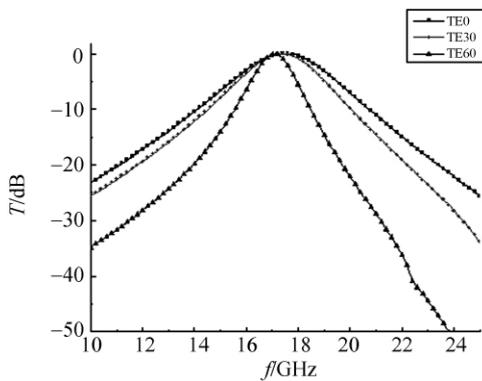


图 4 入射角度变化时叠加 Y 环单元 FSS 的频率响应

Fig. 4 Frequency responses of overlapping Y element FSS for different incident angles

3.4 电磁波以 45° 入射时的极化稳定性

在 FSS 实际应用中,入射波的极化方式是未知的,因此有必要对 FSS 结构的极化稳定性进行

研究。使电磁波以 45° 入射,比较不同极化方式下频率响应的变化,从图 5 可以看出,在相同的入射角度下, TM 极化带宽比 TE 极化略宽, TM 极化时 -3 dB 带宽为 5 GHz, TE 极化时 -3 dB 带宽降为 3 GHz,中心频点均在 17.4 GHz 处,具有较好的极化稳定性。

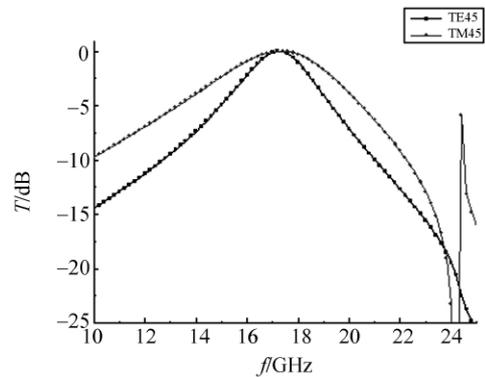


图 5 45° 角入射时叠加 Y 环单元 FSS 对不同极化方式的频率响应

Fig. 5 Frequency responses of overlapping Y element FSS for different polarizations at 45° incidence angle

3.4 叠加 Y 环单元尺寸对 FSS 特性的影响

如图 1 所示,取 $W=1.1$ mm, $w=0.4$ mm,改变臂长 L 的长度。 0° 入射时,频率响应曲线如图 6 所示。当 L 分别取 2.78, 2.98 和 3.18 mm 时,中心频点分别为 17.6, 16, 14.4 GHz。可见随着 L 长度的增加,中心频点向低频移动, -3 dB 带宽保持在 4.5 GHz 不变。

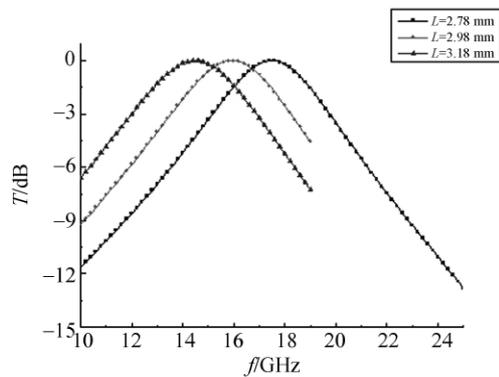


图 6 不同 L 值时叠加 Y 环单元 FSS 的频率响应

Fig. 6 Frequency responses of overlapping Y element FSS for various arm lengths

取 $L=2.78\text{ mm}$, $w=0.4\text{ mm}$, 改变 W 的宽度。 0° 入射时, 频率响应曲线如图 7 所示。当 $W=1.1\text{ mm}$ 时, 中心频点在 17.6 GHz ; $W=1.5\text{ mm}$ 时, 中心频点在 20.6 GHz 。随着 W 的增加, -3 dB 带宽从 4.5 GHz 增加到 7.3 GHz 。

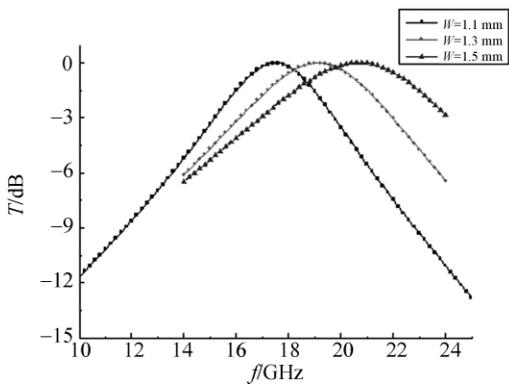


图 7 不同 W 值时叠加 Y 环单元 FSS 的频率响应
Fig. 7 Frequency responses of overlapping Y element FSS for various arm widths

取 $L=2.78\text{ mm}$, $W=1.1\text{ mm}$, 改变宽度 w 。 0° 入射时, 频率响应曲线如图 8 所示。当 $w=0.4\text{ mm}$ 时, 中心频点在 17.6 GHz ; $w=0.6\text{ mm}$ 时, 中心频点在 16 GHz ; $w=0.85\text{ mm}$ 时, 中心频点在 14.4 GHz 。即随着 w 的增加, 中心频点逐渐降低, 并且带宽逐渐减小。

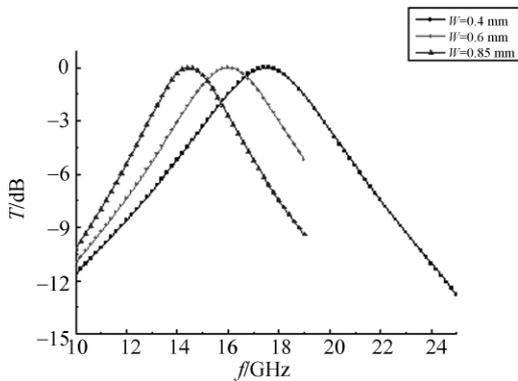


图 8 不同 w 值时叠加 Y 环单元 FSS 的频率响应
Fig. 8 Frequency responses of overlapping Y element FSS for various slot widths

取 $W=1.1\text{ mm}$, $L=2.78\text{ mm}$, $w=0.4\text{ mm}$, $l=2.4\text{ mm}$, 保持横向和纵向的周期相等并同时改变其大小。 0° 入射时, 频率响应曲线如图 9 所示。当周期分别取 $7.2, 7.6, 8\text{ mm}$ 时, -3 dB 带宽分别为 $4.5, 4, 3.5\text{ GHz}$ 。即随着周期的变大,

带宽逐渐减小, 而中心频点保持在 17.6 GHz 不变。

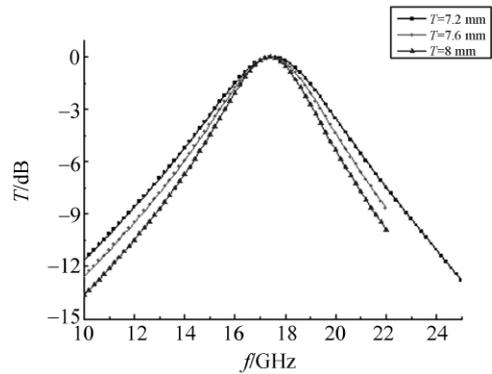


图 9 不同周期时叠加 Y 环单元 FSS 的频率响应
Fig. 9 Frequency responses of overlapping Y element FSS for various gaps

4 验证实验

在厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜 (介电常数为 3.0 , 损耗正切小于 0.01) 表面镀一层厚度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的铜膜, 运用光刻技术^[12-14], 在铜膜表面刻蚀出叠加 Y 环单元图形, 其结构参数如图 1 所示。FSS 试验件大小为 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$, 可以认为是无限大的周期阵列^[15]。在微波暗室中对其进行测量, 用以验证样品的角度稳定性。测试实验使用的频段为 $12\sim 18\text{ GHz}$, 极化方式为 TE 模式, 入射角度为 0° 和 35° 。由图 10 可见, 理论计算值与实际测量值基本一致, 体现出了叠加 Y 环单元良好的角度稳定性。

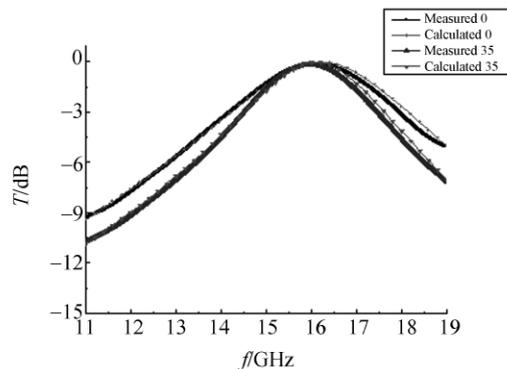


图 10 理论计算与实验结果的比较
Fig. 10 Comparison between calculated values and measured results

5 结 论

本文运用谱域法,对传统的Y环单元与叠加Y环单元进行了比较。分析结果表明,在单元周期相近,中心频点相同的情况下,叠加Y环单元比传统Y环单元具有更窄的带宽,并将高次谐波向高频延迟了6.5 GHz,能够很好地抑制工作频段内多余通带的出现,同时也具有良好的角度稳定性和极化稳定性。分析叠加Y环单元结构的各个参数可知,臂长 L 从2.78 mm增加到

3.18 mm,中心频点从17.6 GHz下降到14.4 GHz,-3 dB带宽保持在4.5 GHz不变;随着臂宽 W 从1.1 mm增加到1.5 mm,中心频点从17.6 GHz升高到20.6 GHz,并且带宽逐渐变大;随着缝隙宽度的减小,中心频点逐渐降低,带宽也逐渐变窄,单元周期从7.2 mm增大到8 mm,-3 dB带宽从4.5 GHz减小到3.5 GHz。通过镀膜和光刻技术,制备了FSS实验件,并在微波暗室中进行测量,得到的实验值与计算值基本一致,为叠加Y环单元FSS的工程化应用提供了参考依据。

参考文献:

- [1] WU T K. *Frequency Selective Surface and Grid Array* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [2] 孙连春. 频率选择表面技术在弹道电子战中应用[J]. 电子对抗, 2002, 2(46): 1-3.
SUN L C. Application of frequency selective surface technology in middle electronic warfare [J]. *Electronic Countermeasure*, 2002, 2(46): 1-3. (in Chinese)
- [3] 卢俊, 张靓, 孙连春. Y形和Y环形单元特性的实验对比研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 219-224.
LU J, ZHANG L, SUN L C. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 219-224. (in Chinese)
- [4] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces-A Review [J]. *IEEE*, 1998 76(12): 1593-1615.
- [5] 孙艳君, 董连和, 陈宇, 等. 频率选择表面的分析方法和仿真技术研究[J]. 红外, 2010, 31(3): 24-29.
SUN Y J, DONG L H, CHEN Y, *et al.*. Study of Analysis Method and Simulation Technology of Frequency Selective Surfaces [J]. *Infrared*, 2010, 31(3): 24-29. (in Chinese)
- [6] 贾宏燕, 高劲松, 冯晓国. 新型单元的频率选择表面[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2076-2080.
JIA H Y, GAO J S, FENG X G. Novel element frequency selective surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2076-2080. (in Chinese)
- [7] 王婕, 邓晖, 董金明. FSS设计中栅瓣现象的研究[J]. 电子测量技术, 2010, 32(1): 25-28.
WANG T, DENG H, DONG J M. Study on the sidelobes for FSS design [J]. *Electronic Measure-*
- ment Technology*, 2010, 32(1): 25-28. (in Chinese)
- [8] 侯新宇, 张澎, 卢俊, 等. 一种双曲率雷达罩的频率选择表面分片设计[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 123-125.
HOU X Y, ZHANG P, LU J, *et al.*. A novel frequency selective surfaces patch design for double curved radome [J]. *Journal of projectiles, Rocket, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 123-126. (in Chinese)
- [9] PELTON E L, MUNK B A. A streamlined radome [J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1974, 32(6): 799-803.
- [10] 约翰. 克劳斯, 章文勋译. 天线(第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
KRAUS J D, ZHANG W X. *Translated. Antennas: for all applications (third edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [11] WU TK. *Frequency selective surface and grid array* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [12] 郑津津, 陈有梅, 周洪军. SU-8紫外深度光刻的误差及修正. [J]. 光学精密工程, 2007, 15(12): 1926-1931.
ZHENG J J, CHEN Y M, ZHOU H J, *et al.*. Correction of pattern transfer errors for SU-8 UV deep lithography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1926-1931. (in Chinese)
- [13] 李加东, 张平, 吴一辉. 用于微镜制作的叠层光刻胶工艺及残余应力控制 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2204-2208.
LI J D, ZHANG P, WU Y H, *et al.*. Laminated photoresist layer technology and residual stress control for micromirror fabrication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2204-2208. (in Chi-

nese)

- [14] 杜立群,秦江,刘冲,等. SU-8 胶紫外光刻的尺寸精度研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 447-452. DU L Q, QIN J, LIU C, *et al.*. Study on dimensional precision of UV-lithography on SU-8 photoresist[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 447-452. (in Chinese)
- [15] GUOREI C. Study on Frequency selective surface with square loop slots[J]. *Journal of Engineer-*

ing and Electronics, 2000, 11(4): 11-16.

- [16] 李小秋,高劲松. Y环单元 FSS 结构参数对频率特性的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1070-1075. LI X Q, GAO J S. Effects of Y loop element structure parameter on frequency response [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1070-1075. (in Chinese).

作者简介:



陈新(1984—),男,吉林长春人,研究实习员,2007年、2009年于吉林大学分别获得理学学士、理学硕士学位,主要从事光学薄膜、飞行器隐身技术的研究。E-mail: chenxin_19344834@163.com



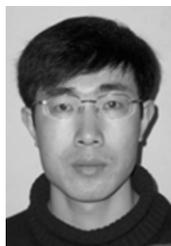
高劲松(1968—),男,吉林白城人,博士,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室主任,主要从事光学薄膜、红外金属网栅、频率选择表面等方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn



王岩松(1979—),女,吉林吉林人,博士,副研究员,2008年获得博士学位,主要从事频率选择表面的研究。E-mail: wangyansong99@yahoo.com.cn



冯晓国(1974—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,1998年于吉林工业大学获得工学学士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得理学博士学位,主要从事光学精密仪器设计和雷达隐身薄膜材料等方面的研究。E-mail: fxg@163.com



梁凤超(1978—),男,吉林松原人,博士,副研究,2000年于武汉理工大学获得工学学士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位,主要研究方向为自动控制和电磁隐身。E-mail: feliang@yahoo.cn