

文章编号 1004-924X(2013)08-1949-08

具有低空气隙敏感度的雪花单元频率选择表面

王岩松*, 高劲松, 陈 新, 赵晶丽

(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:针对在工程研制阶段隐身雷达罩与频率选择表面(FSS)间的空气隙引起的隐身雷达罩传输性能劣化问题,设计了一种具有低空气隙敏感度的新型雪花环状单元频率选择表面以降低空气隙的影响。采用模式匹配法进行了 FSS 理论仿真。为了进行对比分析,针对假定技术指标分别给出新型单元 FSS 和 Y 环单元 FSS 的最优化设计结构,采用光刻工艺制备出等效 FSS 平板样件,在微波暗室中采用自由空间法测试其传输性能以验证设计。仿真和测试结果一致表明:新型雪花单元 FSS 在很大的空气隙内(190~6 500 μm)均满足技术指标,优于 Y 环 FSS 的最大空气隙范围(320~1 900 μm)。最后,简要分析了雪花单元 FSS 设计的优点。分析结果显示,新型雪花单元 FSS 在满足隐身雷达罩常规技术指标的前提下,具有较低的空气隙敏感度,可在工程试验阶段用于 FSS 的研制。

关键词:频率选择表面(FSS);隐身雷达罩;空气隙;雪花单元

中图分类号: TN957; TN713 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.1949

Snow loop element frequency selective surface with low sensitivity to air gaps

WANG Yan-song*, GAO Jin-song, CHEN Xin, ZHAO Jing-li

(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: wangyansong99@163.com

Abstract: As the transmission properties of Frequency Selective Surfaces(FSS) will get worse because of the air gaps between FSS and original radome in the experimental stages, a novel snow loop element FSS was designed to reduce the effect of air gaps. The theoretical simulation was performed by using the mode matching method. For contrast, the best FSS structure designs of the novel snow loop element and Y loop element for the assumed qualification were chosen out respectively. The equivalent FSS sample plates were fabricated by using photolithography, and the transmission properties were tested in a microwave dark room to check the simulation results. Both the calculating and the testing results show that the novel element FSS meets the transmission request in a quite wide air gap range (190–6 500 μm), which is much better than the best Y loop design(320–1 900 μm). Advantages of

收稿日期:2013-03-09;修订日期:2013-05-15.

基金项目:中科院长春光学精密机械与物理研究所第三期创新工程资助项目(No. 093Y32J090)

this new type snow loop element FSS were briefly analyzed. It demonstrates that the snow loop FSS has very low sensitivity to the air gaps, which provides a new method for the FSS study in the experimental stages.

Key words: Frequency Selective Surface(FSS); radome; air gap; snow loop element

1 引言

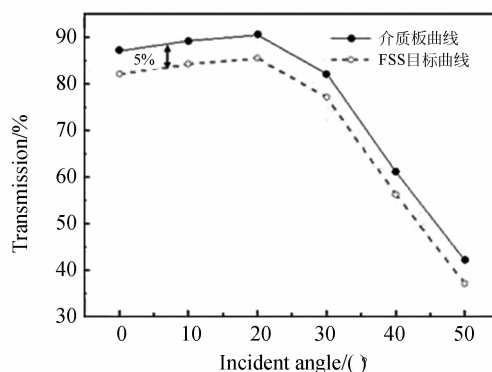
频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS)是一种新型的人工电磁材料,它由大量无源谐振单元组成的单屏或多屏周期性阵列结构构成,相当于一个对入射角、极化方式、频率均有选择作用的空间滤波器^[1-4]。FSS最主要的应用之一就是利用带通型 FSS 制备飞行器隐身雷达罩,其主要原理是将己方雷达制导频段设计在 FSS 的通带,将敌方威胁频段设计在 FSS 的阻带,然后将 FSS 衬罩与雷达罩复合形成隐身雷达罩。这种雷达罩可使己方制导天线自由发射和接收信号,而敌方探测雷达波几乎全部被反射回去,从而实现隐身、抗干扰和防护的功能^[5-7]。

无论在国内还是国外,隐身雷达罩的研制通常按设计→制备→测试→修正的路线进行。其中,实验测试不但可以验证设计的准确性、作为修正设计和工艺参数的主要依据,也是决定研制是否能够转入下一阶段的重要评判标准。然而,在实际工程研制初期,测试状态往往偏离真实状态。FSS 与雷达罩复合需使用永久性胶黏剂,一旦复合后便很难将它们剥离。因此,在测试阶段通常采用临时粘接的方式,即用小块胶带将 FSS 边缘固定在天线罩表面,测试完毕后可将 FSS 轻易剥离,丝毫不损伤天线罩。但在这种方式下 FSS 与雷达罩壁间不可避免地会出现空气隙,而空气隙会引起 FSS 谐振频点漂移,使通带 f_0 处的透过率降低^[8]。尽管设计者们在设计 FSS 时会将空气隙作为一层介质,但空气隙厚度的不均匀、不可测量及不可控性大大增加了设计难度。现有的大多数 FSS 设计都对空气隙比较敏感,一旦实际贴敷的空气隙超出预计范围,传输性能就会严重劣化而无法进入下一阶段的研制。针对这一问题,本文基于 Y 环 FSS 单元结构提出了一种新型雪花环状单元 FSS,这种单元具有较低的空气隙敏感度,在较大的空气隙范围内能保持较好的传输性能。

2 理论计算与分析

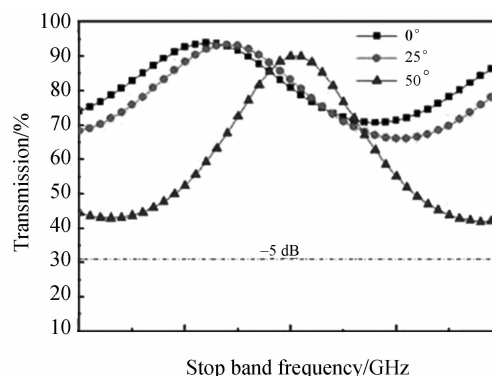
2.1 假定技术指标

本文假定的 FSS 技术指标如下:单屏 FSS 以单侧加载方式与指定介质板复合后,入射角为 $0\sim 50^\circ$;通带 f_0 处的透过率与原介质板相比,下降不超过 5%(绝对值),阻带(X 波段)透过率不高于 -5 dB(31%)。图 1 给出了指定介质板在不同入射角度下的 f_0 及阻带透过率曲线。要达到



(a) 介质板 f_0 点各角度透过率

(a) Transmission coefficient of dielectric board at f_0 under different incident angles



(b) 阻带各角度透过率曲线

(b) Frequency response of stop band under different angles

图 1 假定技术指标传输性能

Fig. 1 Transmission properties of assumed qualification

技术指标,最终设计需同时满足:(1) f_0 各角度透过率曲线在图 1(a)中虚线之上;(2)阻带各角度透过率曲线的最高点在图 1(b)中虚线之下。满足技术指标的空气隙厚度称作“空气隙适用范围”。由于指定介质板的阻带透过率较高,最高点达 90%(-0.45 dB)以上,且该频段距离中心频点 f_0 很近,这给设计增加了难度。虽然可通过增大 FSS 单元周期来压低阻带透过率;但这会导致通带变窄,一旦空气隙导致中心频点漂移, f_0 处透过率将会快速下降至指标以下。

2.2 FSS 等效平板设计结构

本设计采用单屏 FSS 单侧加载于介质板上的结构形式,如图 2 所示。介质板由一种天线罩透波材料构成,其介电常数 $\epsilon=3.0$,损耗正切 $\tan \delta=0.005$,厚度为 28 mm。FSS 单屏和介质板中间的空气隙相当于一层介电常数为 1.0 的介质,空气隙厚度需根据贴敷的实际情况预估,由 FSS 复合于雷达罩的内表面还是外表面、天线罩的外形及表面的光滑程度等因素决定。空气隙厚度通常在几十微米至几毫米。图 2 给出了两种单元的图形结构,左侧的 Y 环单元是应用于 FSS 天线罩的理想单元^[9-10],而本文提出的新型雪花环状单元可看成是 Y 环单元的一种衍生形式,它相当于将两个尺寸一致的 Y 环单元中心重合、其中

一个绕中心旋转 60° 构成。因此,雪花环状单元保留了 Y 环单元的优良特性,其理论计算与分析也是基于 Y 环的计算方法。

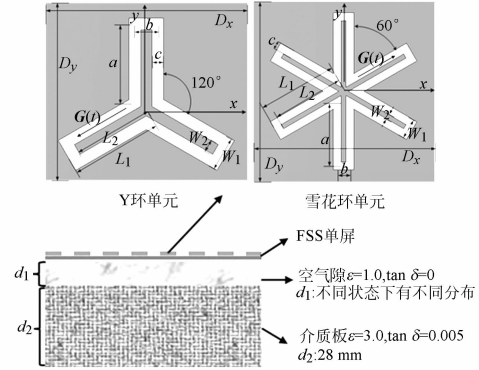


图 2 两种 FSS 设计的单元图形和结构形式

Fig. 2 Structures and shapes of Y loop and snow loop FSS elements

2.3 计算方法及结果

本文采用模式匹配法^[11]进行 FSS 等效平板传输特性的计算。FSS 是二维的周期性结构,因此满足周期电磁结构的弗洛盖(Floquet)定理。将自由空间场和介质区域场以 Floquet 模式展开,将周期表面的电场以一组系数待定的正交完备模式展开,然后两者在周期表面上利用电场和磁场横向分量的连续条件,就得到了一侧有介质加载的周期表面未知电场的积分方程:

$$\sum_{r=1}^2 \left(1 + \frac{1 + DF^r}{1 - DF^r}\right) a_1^{rt} \frac{\Phi_{00}^{(1)}}{\eta_{00}^{(1)}} = \sum_{r=1}^2 \Phi_{00}^{(1)} \int_a \mathbf{E}_b \times \Phi_{00}^{*} \cdot \mathbf{Z} ds + \sum_{r=1}^2 \sum_{i=2}^{\infty} \left(\frac{1}{Z_{pq}^{(1)}} + \frac{1}{Z_{pq}^r}\right) \Phi_{pq}^r \int_a \mathbf{E}_b \times \Phi_{00}^{*} \cdot \mathbf{Z} ds, \quad (1)$$

其中: $Z_{pq}^{(1)} = \eta_{pq}^{(1)} \frac{\eta_{pq}^r + j \eta_{pq}^{(1)} \tan(r_{pq}^{(1)} t_1)}{\eta_{pq}^{(1)} + j \eta_{pq}^r \tan(r_{pq}^{(1)} t_1)}$,

$DF^r = \frac{\eta_{00}^{(1)} - \eta_{00}^r}{\eta_{00}^{(1)} + \eta_{00}^r} \exp(-2j r_{00}^{(1)} t_1)$;

ϕ_{pq}^r 是一组完备正交的 Floquet 模式,在 $p=q=0$ 时 $i=1$,此时对应的 Floquet 模代表平面波, $i \geq 2$ 对应 p, q 不同时为零的其它 Floquet 模; $r=1, 2$ 分别对应 TE 和 TM 极化; A^r 为入射波振幅; $\eta_{00}^{(1)}, \eta_{00}^r$ 分别表示介质和自由空间的模阻抗; $r_{00}^{(1)}, r_{00}^r$ 分别表示介质和自由空间 z 方向的传播常数; $Z_{pq}^{(1)}$ 是任意 i 阶 Floquet 模的等效模阻抗,表示

为:

$$Z_{pq}^{(1)} = \eta_{pq}^{(1)} \frac{\eta_{pq}^r + j \eta_{pq}^{(1)} \tan(r_{pq}^{(1)} t_1)}{\eta_{pq}^{(1)} + j \eta_{pq}^r \tan(r_{pq}^{(1)} t_1)}. \quad (2)$$

周期表面中每一单元孔径上的电场为未知量,可以选择适当的基函数将 \mathbf{E}_b 展开,然后用 Galerkin 方法将积分方程转化为线性方程,求解线性方程即可得到自由空间的传播系数。

为了保证 Floquet 模二重求和的收敛性,全域基函数要比子域基函数更有效。因此, Y 环单元和雪花单元表面的切向电场采用下面的基函数进行展开:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{h}_{bj} &= \begin{cases} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\Gamma_n}{k_0} \sin\left(\frac{2\pi l}{S}\right) e^{-j\Gamma_n z} (\hat{Z} \times \mathbf{G}(l)), j=1,3,5,\dots, n=\frac{j+1}{2} \\ \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\Gamma_n}{k_0} \cos\left(\frac{2\pi l}{S}\right) e^{-j\Gamma_n z} (\hat{Z} \times \mathbf{G}(l)), j=2,4,6,\dots, n=\frac{j}{2} \end{cases}, \\
 \mathbf{e}_{bj} &= \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi l}{S}\right) e^{-j\Gamma_n z} \mathbf{G}(l), j=1,3,5,\dots, n=\frac{j+1}{2} \\ \cos\left(\frac{2\pi l}{S}\right) e^{-j\Gamma_n z} \mathbf{G}(l), j=2,4,6,\dots, n=\frac{j}{2} \end{cases}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

式(3)中:

$$\Gamma_n = \begin{cases} \sqrt{(k_0)^2 - \left(\frac{2\pi l}{S}\right)^2} \\ \pm j \sqrt{\left(\frac{2\pi l}{S}\right)^2 - k_0^2} \end{cases}, a = \frac{L_1 + L_2}{2}, b = \frac{W_1 + W_2}{2}.$$

对于 Y 环单元, $S=6a+3b$; 对于雪花单元, $S=12a+6b$, 这是在采用模式匹配法进行 FSS 数值分析时两种单元基函数的主要不同之处, 另一不同之处为两种单元的方向向量 $\mathbf{G}(l)$ 的不同。

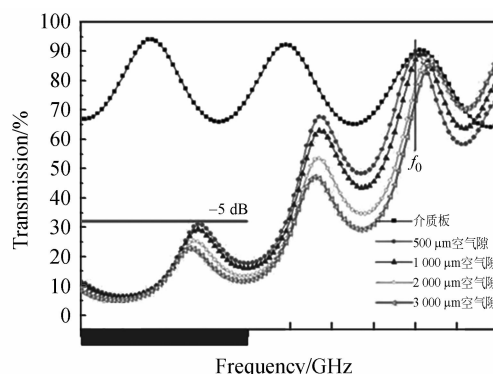
2.4 计算结果与分析

对于本文中的 Y 环单元和雪花环单元, 通过改变单元的外环长、外环宽、缝宽及阵列周期、排布方式等参数, 以尽量拓宽满足假定技术指标的空气隙适应范围为目标进行筛选及优化, 最终选出两种单元的设计参数及空气隙的适用范围, 如表 1 所示。

表 1 两种单元的设计参数及空气隙适用范围
Tab.1 Parameters of two FSS designs and applicable ranges of air gap

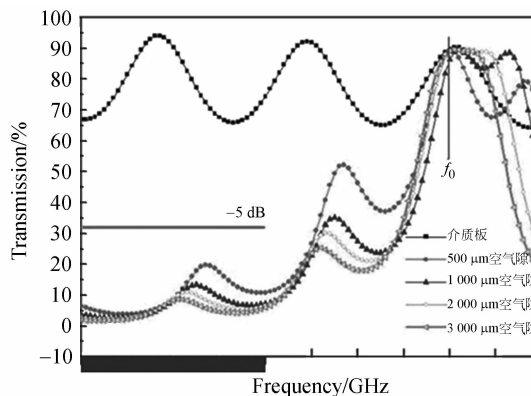
	Y 环单元	雪花环形单元
外环长 L_1 /mm	3.317 6	2.428
外环宽 W_1 /mm	1.595 3	1.105
缝宽/mm	$W_2 = W_3 = 0.649 4$	$W_2 = W_3 = 0.355 8$
排布方式	60° 阵列排布	90° 阵列排布
周期/mm	$D_x = 8, D_y = 6.928$	$D_x = D_y = 7.2$
空气隙适用范围/ μm	320~1 900	190~6 500

从两种单元的设计参数来看, Y 环单元的整体尺寸和周期略大于雪花单元, Y 环单元适合 60° 三角形阵列排布, 雪花单元适合 90° 正方形阵列排布; 从空气隙适用范围来看, 雪花单元设计从很小的 $190 \mu\text{m}$ 空气隙到较大的 $6 500 \mu\text{m}$ 空气隙状态下都能满足假定的技术指标要求, 而 Y 环的空气隙仅为 $320 \sim 1 900 \mu\text{m}$ 。



(a) Y 环 FSS

(a) Y-loop FSS



(b) 雪花 FSS

(b) Snow loop FSS

图 3 不同空气隙的频率响应仿真结果

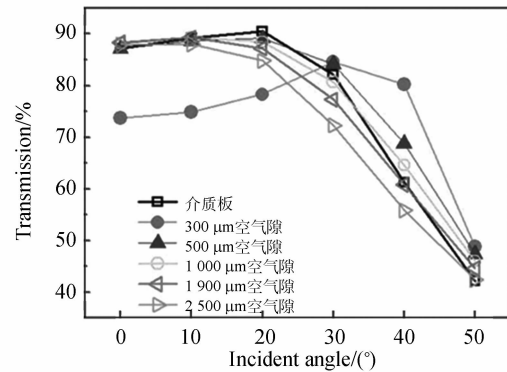
Fig. 3 Frequency response in simulation under different air gaps

图 3 为两种设计在不同空气隙下的仿真曲线, 由于曲线太多无法一一列举, 这里选取 20° 入射角, TE 极化, 空气隙分别为 $500, 1 000, 2 000, 3 000 \mu\text{m}$ 几种状态的仿真曲线为例来比较分析两种设计。由图可知, 两种设计的阻带透过率均在 -5 dB 以下, 满足阻带指标, 但雪花设计的阻带

效果明显优于 Y 环设计;在设计时,两种设计均将 $500\ \mu\text{m}$, 20° 入射角的谐振点设计在 f_0 处,这一状态下透过率最高点与介质板在 f_0 点的透过率非常接近。随着空气隙的逐渐增大, Y 环曲线的最高点向高频移动,同时最高点的透过率降低,空气隙从 $500\ \mu\text{m}$ 增至 $3\ 000\ \mu\text{m}$, f_0 点透过率由 89.5% 快速降至 73.8% , 已远远低于指标;而对于雪花设计,曲线最高点先向高频移动而后又向低频移动,在本设计中这个转折点在 $2\ 000\ \mu\text{m}$, 空气隙从 $500\ \mu\text{m}$ 增至 $3\ 000\ \mu\text{m}$, f_0 点透过率由 89.6% 变为 89.2% , 几乎没有降低。这一点很特别,因为对于大多数 FSS 设计而言,透过率随空气隙变化的规律都与本文中的 Y 环设计类似;又由于随角度增大,中心频点也会向高频漂移,同时透过率降低,这两个因素合在一起会加速中心频点高漂,造成目标频点的透过率快速下降,因而无法满足透过率指标,即表现为空气隙适用范围小。而在新型雪花设计中,随空气隙增大,中心频点出现低漂的现象,这相当于空气隙与角度变化对中心频点的作用相互抵消了一部分,这是新型单元空气隙适用范围大的主要原因之一。

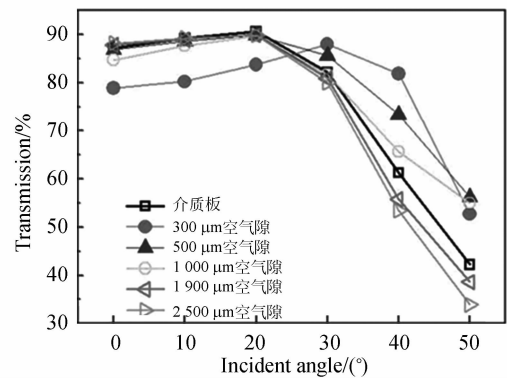
从图 3 中还能够发现雪花设计的另外两个特点:一点体现在中心频点随空气隙漂移的幅度及最高点透过率随空气隙增大而下降的幅度上,雪花单元比 Y 环单元小得多;另一点体现在当空气隙大至一定程度时,雪花设计曲线会出现“平顶”,即通带附近两个谐振峰之间的凹陷逐渐消失,慢慢重合为一个峰,这相当于加宽了通带。因此可以有效阻止目标频点透过率随的曲线漂移而下降过快,而这种“平顶”在 Y 环设计中没有出现。上述几点就是新型雪花单元的空气隙适用范围大于 Y 环的主要原因。

图 4 给出了两种设计在 $0\sim 50^\circ$ 入射角及不同空气隙状态下与介质板在 f_0 点透过率的对比。由图可知,不同入射角度下 f_0 点透过率在空气隙改变时,有些角度的透过率增大,另外一些角度的透过率则减小;而空气隙的适用范围取决于所有角度下 f_0 点透过率是否全部达到指标。在进行 FSS 设计时,尽管可以通过调整设计参数来提高某些角度下的 f_0 点透过率,但很难兼顾所有角度,而找到对空气隙不敏感的新型单元并在此基础上进行设计优化才是解决空气隙难题的合理手段。



(a) Y 环 FSS

(a) Y-loop FSS



(b) 雪花 FSS

(b) Snow loop FSS

图 4 FSS 与介质板在不同空气隙各角度 f_0 点透过率的对比

Fig. 4 Comparison of f_0 transmission coefficient between FSS and dielectric board

3 实验验证

3.1 等效平板的制作

FSS 等效平板是指按隐身雷达罩的结构将 FSS 薄膜与雷达罩介质平板复合形成的平板,通过对 FSS 等效平板传输性能的测试来验证设计。FSS 薄膜的制备采用光刻工艺^[12],这种方法制备的 FSS 薄膜具有较高的精度,线条精度可控制在 $\pm 10\ \mu\text{m}$ 内,图 5 为制备的 Y 环和雪花 FSS 薄膜。将不同厚度、边长为 $5\ \text{mm}$ 的正方形双面胶垫分散在介质平板上边缘及中心点,人为地间隔出不同厚度的空气隙,由于胶垫与空气的占空比较小,所以可认为与仿真状态一致。但是 $500\ \mu\text{m}$ 以下的空气隙很难精确控制,因此测试验证以大空气隙为主。

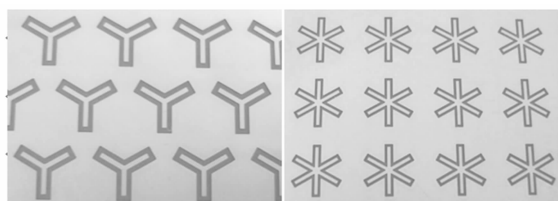


图 5 Y 环和雪花 FSS 薄膜样件

Fig. 5 Samples of Y loop and snow loop FSS

3.2 FSS 传输性能测试

FSS 传输性能测试采用自由空间法,自由空间法测试系统以安捷伦 N5244A 型矢量网络分析仪为核心,相距 1 m 的两个透镜天线作为发射和接收天线,试件放置于两透镜天线的焦平面上,通过转台控制入射角度,测试示意图如图 6 所示。

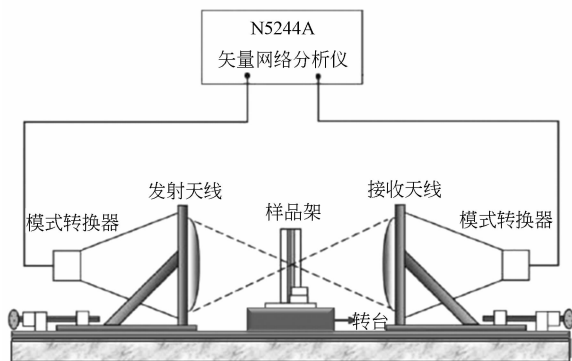
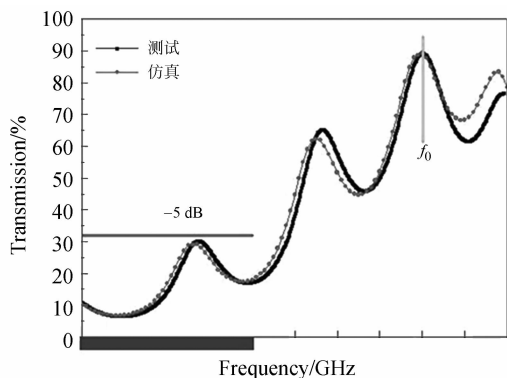


图 6 自由空间法测试示意图

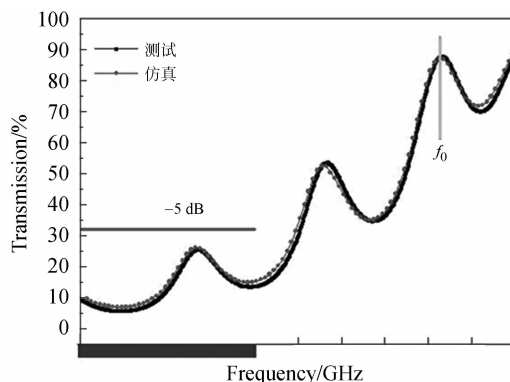
Fig. 6 Diagram of free space method

图 7 为两种单元 FSS 等效平板在 20° 入射、500 μm 及 2 000 μm 空气隙的状态下的仿真与测试曲线。由图可以看出,测试与仿真曲线吻合度很好,500 μm 空气隙的吻合度略差于 2 000 μm 空气隙,这是由于空气隙越小越不容易精确控制,



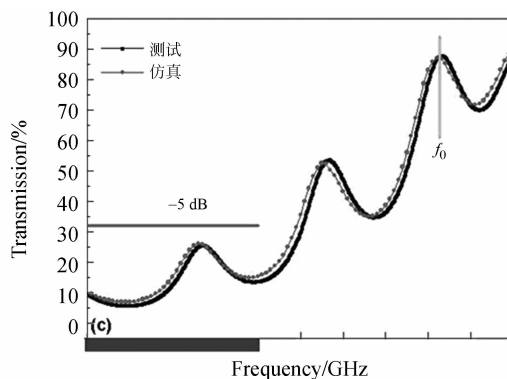
(a)Y 环 500 μm 空气隙

(a)Y loop with 500 μm air gap



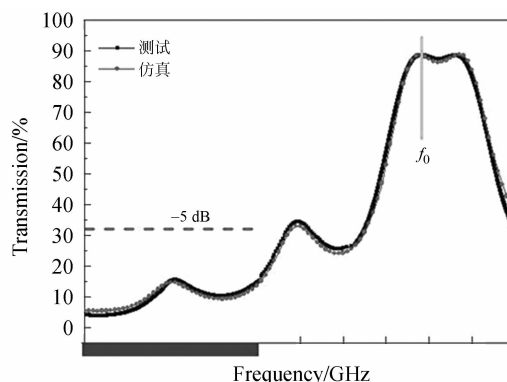
(b)Y 环 2 000 μm 空气隙

(b)Y loop with 2 000 μm air gap



(c)雪花 500 μm 空气隙

(c)Snow loop with 500 μm air gap



(d)雪花空气隙

(d)Snow loop with 2 000 μm air gap

图 7 Y 环 FSS 和雪花 FSS 典型测试曲线与仿真曲线对比

Fig. 7 Comparison of tested and simulated frequency response between Y loop and snow loop FSS

致使空气隙与预期不符。总的来说,测试结果基本验证了两种单元设计的特点,从而说明理论计算正确。

4 结 论

本文设计了一种新型雪花环状单元的 FSS, 通过提出的设计理论计算得到雪花环状单元比 Y 环单元设计的空气隙适用范围大, 其主要原因有: (一) 在中心频点及最高点透过率随空气隙改变的幅度上, 雪花单元比 Y 环单元小得多; (二) 随空气隙增大, 雪花单元的中心频点会出现略向低频漂移的阶段, 这部分抵消了中心频点随角度增大产生的高频漂移; (三) 当空气隙大至一定程度时, 雪花设计曲线 f_0 附近区域会出现“平顶”, 而这种

“平顶”也可以有效阻止 f_0 点透过率因曲线漂移而下降得过快。

新型雪花单元 FSS 在满足隐身雷达罩常规技术指标的前提下, 具有较低的空气隙敏感度, 空气隙为 $190 \sim 6\,500 \mu\text{m}$, 这一结果优于 Y 环 FSS 的最大空气隙范围 ($320 \sim 1\,900 \mu\text{m}$), 为工程验证阶段的 FSS 设计提供了一个很好的选择。另外, 由于该图形只要旋转 60° 就能与原图形完全重合, 理论上比 Y 环单元具有更好的圆极化稳定性; 针对同一谐振频点, 新型单元的尺寸小于 Y 环单元, 这有利于减小单元图形从平面到曲面过程中的形变量, 更适合应用在曲面天线罩上。

参考文献:

- [1] 徐念喜, 冯晓国, 梁凤超, 等. 对称双屏 Butterworth 型频率选择表面的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1486-1494.
XU N X, FENG X G, LIANG F CH, *et al.*. Design of symmetric dual Butterworth-type of frequency selective surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1486-1494. (in Chinese)
- [2] 王珊珊, 高劲松, 冯晓国, 等. Y 孔分形频率选择表面的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 959-966.
WANG SH SH, GAO J S, FENG X G, *et al.*. Design methods of Y aperture fractal FSS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 959-966. (in Chinese)
- [3] 陈新, 高劲松, 王岩松, 等. 叠加 Y 环单元频率选择表面的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2043-2049.
CHEN X, GAO J S, WANG Y S, *et al.*. Design of overlapping Y loop element FSS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2043-2049. (in Chinese)
- [4] CHAHARMIR M R, SHAKER J, LEGAY H. Dual-band Ka/X reflectarray with broadband loop elements [J]. *IET Microw. Antennas Propag.*, 2010, 4(2): 225-231.
- [5] ILBEOM C, JIN G K, DAI G L, *et al.*. Aramid/epoxy composites sandwich structures for low-observable radomes [J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71:1632-1638.
- [6] PO C K, DAI G L, II S S, *et al.*. Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surfaces[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(9): 2163-2170.
- [7] MITTRA R. Techniques for analysis frequency selective surfaces-a review [J]. *Pro. IEEE*, 1988, 76(12):1593-1615.
- [8] 蒙志军, 吕明云, 武哲, 等. 单层带通 FSS 结构中空气间隙的影响[J]. 电波科学学报, 2008, 23(6): 1123-1128.
MENG ZH J, LÜ M Y, WU ZH, *et al.*. Influence of air gaps in single-layer bandpass FSS structures [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(6):1123-1128. (in Chinese)
- [9] 卢俊, 张靓, 孙连春. Y 形和 Y 环形单元特性的试验对比研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):219-224.
LU J, ZHANG J, SUN L CH. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):219-224. (in Chinese)
- [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. *Antenna* [M]. ZHANG W X trans., Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005. (in Chinese)
- [11] CHEN C C. Diffraction of electromagnetic waves by a conducting screen perforated periodically with circular holes [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1971, 19(5):475-481.
- [12] 刘小涵, 冯晓国, 赵晶丽, 等. 球面旋涂光刻胶工艺 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(8):1810-1815.
LIU X H, FENG X G, ZHAO J L, *et al.*. Process of spherical photoresist spin coating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1810-1815. (in Chinese)

作者简介:



王岩松(1979—),女,吉林省吉林市人,博士,副研究员,2005年于吉林大学获得硕士学位,2008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,主要从事频率选择表面技术、SiCN陶瓷材料等方面的研究。E-mail: wangyansong99@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。Email: gaojs@ciomp.ac.cn



陈新(1984—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,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



赵晶丽(1962—)女,吉林长春人,高级实验师,主要从事光刻复制工艺的研究。E-mail: fxx@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)