

文章编号 1004-924X(2008)07-1247-06

即贴型单层带通 FSS 的传输特性

蒙志君, 黄俊, 武哲, 吕明云

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:以狭缝阵列为例,利用模匹配法并结合实验对即贴型频率选择表面(FSS)与介质板的复合结构进行了研究,分析了不同厚度的聚酰亚胺基底膜和粘合胶层对谐振频率的影响以及不同复合方式下的频率响应。结果表明,即贴型 FSS 结构中,基底膜与粘合胶层等细节的影响不可忽略,影响程度与复合方式和介质厚度均密切相关。复合结构中应当含有粘合胶层,避免空气间隙的影响。仅当基底膜和粘合胶层的介电常数小于介质板或与之相近,且介质板厚度为基底膜和粘合胶层厚度的 10 倍以上时,采用合适的复合方式,才能使基底膜和粘合胶层对复合结构传输特性的影响降至最低。一系列厚度的介质单侧加载时的 FSS 结构频率响应测试结果与计算结果的对比表明,粘合工艺的缺陷会导致即贴型 FSS 结构的传输性能发生变化,FSS 的设计应当全面考虑上述因素的影响。

关键词:频率选择表面(FSS); 传输特性; 介质加载; 实验

中图分类号:TN015 **文献标识码:**A

Transmission properties of adhesive single-layer bandpass FSS

MENG Zhi-jun, HUANG Jun, WU Zhe, LÜ Ming-yun

(School of Aeronautic Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: By taking slot arrays as illustrative examples, the compound structures of Frequency-Selective-Surface (FSS) and dielectric slab were investigated based on modal matching method and experimentation. The frequency responses of FSS structures by different compounding approaches were analyzed, including the influence of polyimide base film and adhesive coating with different thicknesses on resonant frequency. The results show that the influence of base film and adhesive coating in FSS structures can not be neglected, for they have a close relationship with the compounding approach and dielectric thickness. The compound structure should contain adhesive coating to eliminate the effect of air gap. When dielectric constants of base film and adhesive coating are less than or close to that of the slab only, the slab is over 10 times thicker than those of base film and adhesive coating, the influence of base film and adhesive coating on the transmission properties of properly compound structures would be the minimum. The comparison of measurement and computation of frequency response of FSS structures loaded with dielectric slab of a series thickness on one side shows that the flaw of adhesion will change the transmission properties of FSS structures. All factors mentioned above should be considered in FSS design.

Key words: Frequency Selective Surface(FSS); transmission property; dielectric loading; experimentation

收稿日期:2007-10-30;修订日期:2007-12-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 90305026);装备预研重点基金资助项目(No. 6140510)

1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)技术一直是天线和雷达罩等领域的研究热点。带通 FSS 结构一般是在金属屏上加工一系列的缝隙单元,并由一层或多层介质加载,呈现出带通滤波特性,使电磁波能通过所需频段而屏蔽其它频段,尤其适用于雷达舱的带外隐身^[1-2]。

实验是研究 FSS 的重要手段^[3-4],但类似于文献^[3-4]中的实验研究具有一定的局限性,原因在于其介质厚度没有变化或变化范围有限。采用即贴型 FSS 是深入研究介质特性较好的一种方式,该方式独立加工 FSS 膜,再将其通过粘合胶层与不同特性的介质复合,其优点在于 FSS 膜和衬底介质可重复利用,能进行系统化的实验研究。与介质即贴复合时,复合方式的影响不可忽略,包括基底膜和粘合胶层的材料和位置以及介质特性等各方面的影响。

本文以简单的狭缝阵列为例,对即贴型 FSS 与介质板的复合方式进行了研究,利用已经非常成熟的模匹配法^[5-6]并部分结合实验进行计算分析。主要分析了不同厚度的聚酰亚胺基底膜和粘合胶层的影响,并深入研究了不同复合方式下的频率响应,相关结论对 FSS 实验研究具有重要意义。另外,还给出了一系列厚度的介质单侧加载时的 FSS 结构频率响应测试结果,首次以一系列的实验值验证了介质厚度的影响。

2 模型与方法

2.1 无胶覆铜箔聚酰亚胺薄膜

如图 1 所示,无胶覆铜箔聚酰亚胺(PI)薄膜结构由铜箔和 PI 薄膜组成。这种结构比有粘结剂的三层基材结构厚度更薄、质量更轻,具有更好的挠曲性和耐热性,且介电损耗更小^[7]。一般使用两种铜箔:电解沉积(ED)铜箔或压延(RA)铜箔。两者的差别在于挠曲性、延展性和拉伸强度,而 FSS 膜系结构的力学性能主要取决于 PI 基膜,而与铜箔机械性能关系不大。铜箔的厚度也非常小,在微波段认为是无限薄的理想导体。

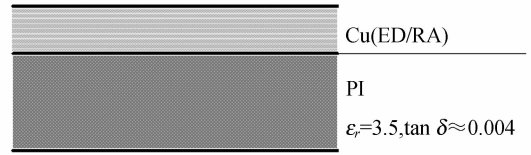


图 1 无胶覆铜箔聚酰亚胺薄膜结构

Fig. 1 Structure of adhesiveless copper-clad polyimide film

2.2 FSS 阵列参数与加工方法

本文研究的 FSS 阵列几何参数及入射波条件如图 2 所示,由于主要研究基底膜、即贴粘合胶层及介质影响,故采用简单的狭缝阵列。研究的入射参数均为正入射: $\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{x} = 0, \varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$ 。

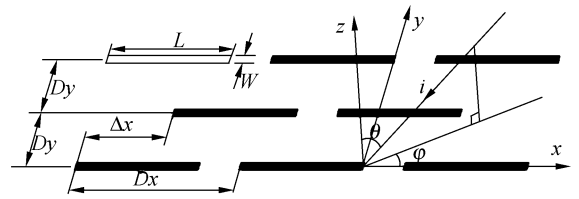


图 2 狭缝阵列几何参数及入射参数

Fig. 2 Geometrical parameters of slot array and incident wave parameters

由于膜为柔性材料,目前 FSS 膜的加工方法主要采用光化学蚀刻,即采用印制电路板技术在覆铜板或膜上腐蚀 FSS 单元^[8]。该技术是先制出照相底图,然后经过照相、底片冲洗等工艺步骤,制出与 FSS 平板尺寸大小相同的照相原版。最后,将照相原版上的 FSS 单元小图形转移到覆铜板或膜上。现在,该项技术在 FSS 相关的实验研究中大量采用^[9],已经比较成熟。

2.3 计算与实验

对于无限大周期平面 FSS 阵列的严格数值计算均基于周期矩量法,模匹配法是其中一种,在大量文献中均有较为全面的阐述^[5-6]。图 3 所示结构中各区域的电场进行了 Floquet 模展开,各分界面上满足电磁场连续边界条件,通过满足 FSS 单元孔径内切向电场和磁场连续的条件形成以切向电场为未知量,描述 FSS 结构频率响应的积分方程:

$$\sum_{r=1}^2 \sum_{pq} (Y_{pq}^{1r} + Y_{pq}^{(1)}) \boldsymbol{\psi}_{pq} \iint_S \mathbf{E}_t \cdot \boldsymbol{\psi}_{pq}^* ds = 2 \sum_{r=1}^2 (A_{00r} \boldsymbol{\xi}_{00r} \prod_{k=1}^N U_{00r}^k \boldsymbol{\psi}_{00r}), \quad (1)$$

式中, p, q 为 Floquet 模谐因子, r 表示 TE 或 TM 模, ψ 为矢量 Floquet 模, ϵ_{00} 表示自由空间导纳, A_{00} 为入射波系数, E_t 为孔径内切向电场, S 为孔径面积, $Y_{pq}^1, Y_{pq}^{(1)}$ 分别表示从 FSS 向 $-z$ 方向和 $+z$ 方向看去的等效导纳, 可从最外层介质与自由空间的界面处开始递推, 分别求出两个等效导纳。

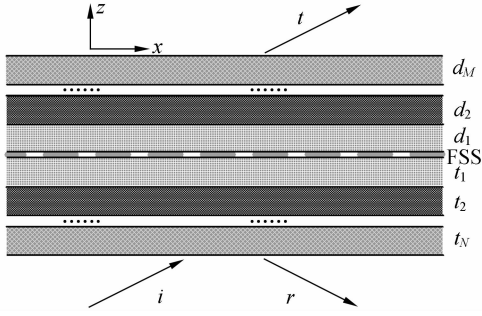


图 3 单层 FSS 结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single-layer FSS structure

对式(1)所得积分方程用矩量法求解, 将孔径内切向电场用一组基函数表述, 进而根据所得矩阵方程求出基函数的系数, 利用传输线理论可以获得最终的透射系数和反射系数, 不再赘述。

研究过程中还采用了实验手段, 在微波暗室中进行透波率测试, 与文献[5]的实验条件和方法完全一致, 测试系统如图 4 所示。不同点在于本实验针对尺寸为 $600\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的 FSS 膜系及其与不同厚度介质板的复合结构。

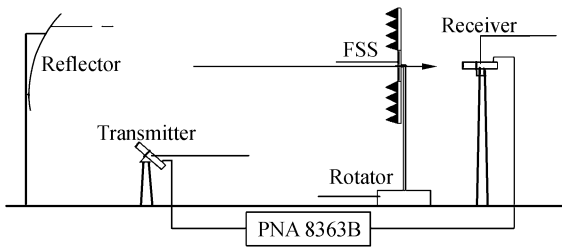


图 4 FSS 试件传输响应测试系统

Fig. 4 Measurement system for frequency response of FSS

3 分析与讨论

3.1 基底膜与粘合胶层的影响

将图 1 所示结构中铜箔层视为无限薄理想导

体, 并蚀刻出 FSS 阵列; 基底膜则为 PI 薄膜, 实验件的 PI 薄膜厚度为 $d_{PI} = 50\ \mu\text{m}$, 介电常数和损耗角正切分别为, $\epsilon_r \approx 3.5, \tan \delta = 0.004$ 。

图 5 中计算值给出了 $50\ \mu\text{m}$ 的 PI 基底膜的影响, 并与实验值比较, 吻合较好。结果表明 $50\ \mu\text{m}$ 的 PI 膜使单元尺寸为 $15\ \text{mm}$ 和 $10\ \text{mm}$ 的狭缝阵列谐振频率分别下降了 $0.6\ \text{GHz}$ 和 $0.9\ \text{GHz}$, 影响不可忽略。表 1 中进一步给出了正入射时典型基底膜厚度下 ($1 \sim 4\ \text{mil}$) 的谐振频率和 $-3\ \text{dB}$ 带宽, 随膜的厚度增加, 谐振频率逐渐降低, 且降低越来越缓慢; 带宽也逐渐变小。

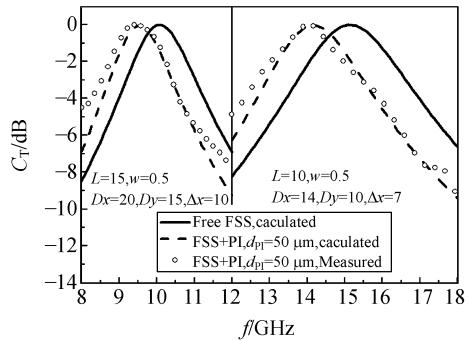


图 5 基底膜的影响

Fig. 5 Influence of polyimide film

图 6 为粘合胶层的影响, 规律与表 1 类似, 胶层厚度分别为 $25, 50$ 和 $75\ \mu\text{m}$ 时, 相比没有粘合胶层时, 谐振频率依次下降了 $0.5, 0.9$ 和 $1.2\ \text{GHz}$, 下降趋势逐渐减缓。其中还给出了厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 时的实验结果, 与计算值吻合较好, 对比图 5 右侧自由屏 FSS 的谐振频率 $15.1\ \text{GHz}$, 总共下降达到 $1.8\ \text{GHz}$ 。

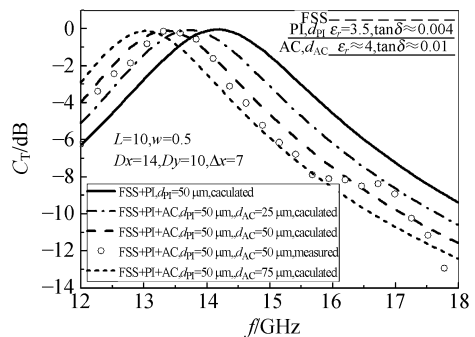


图 6 粘合胶层的影响

Fig. 6 Influence of adhesive coating

表 1 传输性能随 PI 膜厚度的变化

Tab. 1 Change of transmission properties with PI film thicknesses (f_0 : resonant frequency Δf : -3 dB band width)

| $d_{PI} (\mu m)$ | $L=15, w=0.5$ | | $L=10, w=0.5$ | |
|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| | $Dx=20, Dy=15, \Delta x=10$ | | $Dx=14, Dy=10, \Delta x=7$ | |
| | f_0 (GHz) | Δf (GHz) | f_0 (GHz) | Δf (GHz) |
| 0 | 10.1 | 1.9 | 15.1 | 2.9 |
| 25 | 9.8 | 1.8 | 14.6 | 2.7 |
| 50 | 9.5 | 1.7 | 14.2 | 2.6 |
| 75 | 9.3 | 1.7 | 13.8 | 2.5 |
| 100 | 9.1 | 1.5 | 13.5 | 2.4 |

3.2 复合方式的影响

将 FSS 膜与介质板以即贴方式进行复合,有多种可能。在一般性的测试中,将 FSS 膜与衬底介质板复合时常常不使用粘合胶层,而是用小胶带沿膜的边或角粘贴在介质板上,这样可能含有空气隙。使用粘合胶层复合则是用宽的双面胶将整张 FSS 膜粘贴在介质板上,消除空气间隙的影响,而且不影响膜的重复使用。图 7 中给出了两种方式的测试结果,介质板厚度为 1 mm,介电参数为 $\epsilon_r=3.8, \tan \delta=0.015$ 。图中左侧结构为含粘合胶层的复合方式,右侧结构反之,可见两种结构的传输特性有很大差别,不含粘合胶层的复合方式不符合理论规律^[2],这是由于其中含有空气间隙所致,而且空气间隙的影响很大;另外,空气间隙不可控制,故实验中该结构的频率响应测试结果重复性很差。根据预估规律^[2],实验中所用介质板单侧加载时,谐振频率应降至 10~11 GHz 附近,故含粘合胶层的复合结构的测试结果是合理的,并具有良好的重复性。

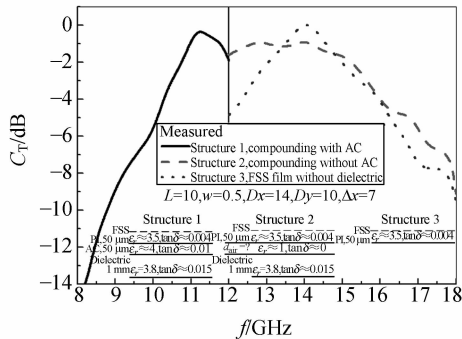


图 7 含粘合胶层与不含粘合胶层的复合结构对比
Fig. 7 Comparison between the compound structures with and without adhesive coating

对空气间隙的影响进行了更为深入的研究,图 8 中给出了相应 FSS 结构中的空气间隙厚度 d_{air} 对谐振频率的影响。图中给出了 1 mm 和 8.2 mm 两种介质板厚度的结果,谐振频率随空气间隙厚度变化的整体趋势相同,当 d_{air} 从 0 到 $\lambda/30$ (1 mm) 变化时,谐振频率变化剧烈,随 d_{air} 增大而剧增,与没有空气隙时相比, d_{air} 为 0.2 mm 时谐振频率偏高约 1 GHz; d_{air} 为 1 mm 时谐振频率偏高约 2 GHz; 当 d_{air} 增大至 $\lambda/5$ (6 mm) 以上后,谐振频率开始进入稳定状态,并发生周期性变化,周期均为 $\lambda/2$ (15 mm)。

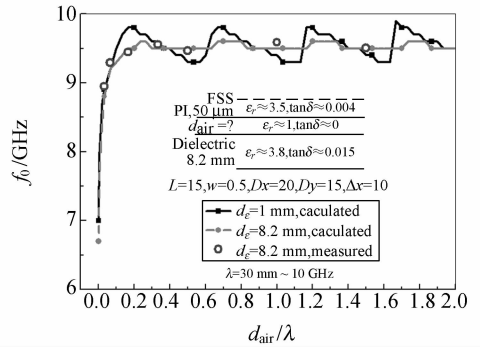


图 8 空气间隙对谐振频率的影响
Fig. 8 Influence of air gap on resonant frequency

空气间隙的影响也与介质板厚度 d_e 相关,图 8 中两种厚度的区别在于, d_e 为 8.2 mm 时,进入稳定状态后的谐振频率变化很小,始终稳定在 FSS 膜的谐振频率 9.5 GHz 附近,这是由于该频率下相应的 λ_e 恰为 8.2 mm,导致空气间隙较大时 8.2 mm 介质板对 FSS 加载效应不明显;而 1 mm 介质厚度时频率变化则较为剧烈。图中还给出了 d_e 为 8.2 mm 时的部分测试数据,与计算结果吻合良好。

含粘合胶层时粘贴方式对整个结构的传输特性的影响如图 9 所示,结构 1 为理论模型(或覆铜板模型);结构 2 中 FSS 金属屏位于外侧,粘合胶层将 PI 基底膜粘贴在介质板上;结构 3 则将 FSS 金属屏粘贴在介质板上,PI 膜位于外侧,可作为保护膜。计算结果表明,结构 2 与结构 1 的传输特性基本相同,而结构 3 则差异明显,谐振频率下降 0.3 GHz,原因是由于结构 3 中 PI 基底膜位于 FSS 金属屏的另一侧,整个结构相当于不对称的双侧加载,与结构 1 和 2 的单侧加载有质的区别。结构 2 和 1 曲线基本重合,说明结构 2 中 PI 基底

膜和粘合胶层的影响“淹没”在相对很厚的介质板中。但加载方式并非唯一的影响因素, 将结构 2 中粘合胶层的介电常数从 4.0 增大到 10.0, 传输特性有很大变化, 谐振频率漂移到低于结构 30.2 GHz。故即贴型 FSS 结构中应当尽量使基底膜和粘合胶层的介电常数小于介质板或与之相近, 才能减小基底膜和粘合胶层的影响, 降低设计难度。

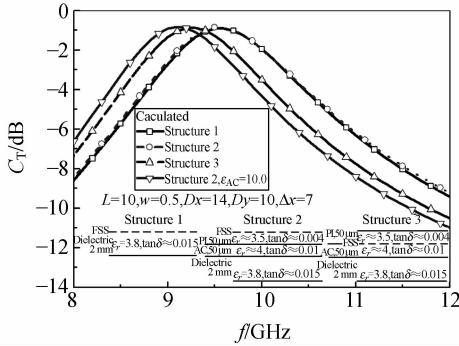


图 9 粘贴方式的影响

Fig. 9 Influence of adhesive approach

基于这一结论, 可预测罩壁表面涂层对 FSS 结构电性能的影响。以图 9 中结构 1 为基础, 若在金属屏表面涂覆防雨蚀涂层(取 $\epsilon = 3.5, \tan \delta = 0.025, d = 0.2 \text{ mm}$)和防静电涂层(取 $\epsilon = 6.0, \tan \delta = 0.25, d = 0.05 \text{ mm}$), 则相等于双侧加载, 会对原结构的频率响应曲线有很大影响; 若在介质侧覆盖涂层, 则涂层的影响相对较小。两种方式的计算结果如图 10 所示, 与无涂层的结果对比, 表明涂层若位于 FSS 金属屏一侧, 则传输特性变化很大, 谐振频率漂移 1 GHz 左右, 带内损耗剧增; 反之, 若涂层位于介质一侧, 则影响很小, 频率漂移不到 0.1 GHz, 带内损耗略有增大。

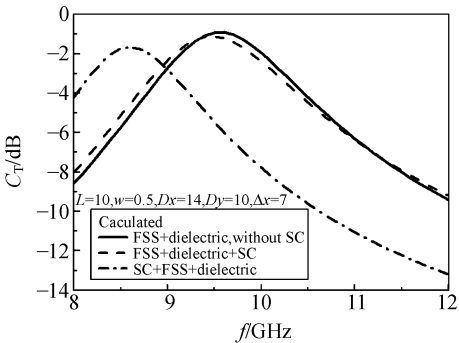


图 10 表面涂层的影响

Fig. 10 Influence of surface coating

其他方式的保护涂层亦类似于上述基底薄膜或粘合胶层, 影响程度与复合方式密切相关, FSS 的设计过程中也必须考虑到这些细节的影响, 避免因表面涂层等因素导致预期的性能发生变化。

3.3 衬底介质厚度的影响

介质厚度对单层 FSS 的影响已经研究得非常透彻^[10], 文献[6]计算不同的单元也得到同样的结论, 但这些研究均是针对双侧对称加载的方式。本文计算了介质单侧加载方式, 并进行了实验测试。制作了一系列厚度的 D 玻璃布/LWR-2 层压板: 0.5、1、2、4、8 mm, 并可由此组合出更多的介质厚度, 介电常数与图 7 和图 9 相同。

图 11 中包含了图 9 中两种结构的计算结果, 随介质厚度从零增大, 谐振频率逐渐降低, 但降低越来越缓慢, 达到一定厚度后不再降低, 谐振频率稳定在 9.5~10 GHz 附近, 即为自由屏 FSS 谐振频率的 $1/\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}$ ^[21]。结构 1 和 2 的谐振频率在介质板厚度 > 1 mm 时基本相同, 即当介质厚度满足条件 $d_e/(d_{PI}+d_{AC}) > 10$ 时才能使基底膜和粘合胶层的影响小到“淹没”在较厚的介质板中; 而厚度 < 1 mm 有明显差别, 且介质越薄结构 2 的谐振频率相对结构 1 更低, 尤其是介质板厚度与 PI 基底膜或粘合胶层的厚度为同一量级时, 基底薄膜和粘合胶层的影响更为显著。

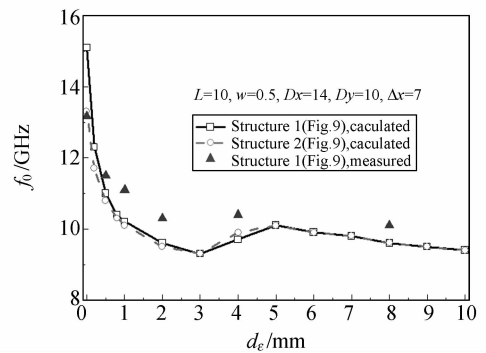


图 11 介质厚度对谐振频率的影响

Fig. 11 Influence of dielectric thickness on resonant frequency

实验结果与计算结果保持了完全一致的趋势, 较好的体现了计算规律。但仍有一定差别, 整体上比计算结果偏高 0.5 GHz 左右, 原因主要是使用粘合胶层将 FSS 膜和介质板复合的方式并未达到理想状态, 存在粘合不均匀、局部含空气隙

等缺陷,说明即贴 FSS 结构的粘合工艺对传输特性影响较大。将图 11 与图 8 中计算值和实验值吻合程度进行对比也能说明上述原因。

4 结 论

本文考察了不同厚度的基底膜与粘合胶层对自由屏 FSS 谐振频率的影响,以及 FSS 膜与介质复合方式对整个结构传输特性的影响。结果表明,即贴型 FSS 结构中,基底膜与粘合胶层等细节因素不可忽略,影响程度与复合方式和介质厚度均密切相关。空气间隙对谐振频率的影响也很

大,本文的算例中 0.2 mm 的空气间隙导致谐振频率偏高了 1 GHz,而当空气间隙 $>\lambda/5$ 时,介质加载效应基本消失。故复合结构中应当含有粘合胶层,以避免空气间隙的影响。实验结果还表明,仅当基底膜和粘合胶层的介电常数小于介质板或与之相近,采用合适的复合方式,且介质板厚度为基底膜和粘合胶层厚度的 10 倍以上时,才能使基底膜和粘合胶层对复合结构传输特性的影响降至最低。FSS 的设计过程中必须考虑上述诸多因素。本文的研究结果将对即贴型 FSS 的实验研究有重要意义。

参考文献:

- [1] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces - a review [C]. *Proceedings of the IEEE*, 1988, 76(12): 1593-1615.
- [2] MUNK B A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* [M]. New York: John Wiley, 2000.
- [3] 王焕青,吕明云,武哲. 介质加载对频率选择表面传输特性影响的实验研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(1): 27-30.
WANG H Q, LV M Y, WU ZH. Experiment on the influence of dielectric loading on transmission properties of frequency selective surfaces[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005, 24(1): 27-30. (in Chinese)
- [4] 王焕青,吕明云,武哲. FSS 对 TE 极化波传输特性的实验研究[J]. *电子学报*, 2005, 33(6): 1099-1101.
WANG H Q, LV M Y, WU ZH. Experiment on transmission properties of TE polarized plane wave incident on frequency selective surfaces[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 1099-1101. (in Chinese)
- [5] VARDAXOGLU J C. *Frequency Selective Surfaces*[M]. London: Research Studies Press, 1997.
- [6] 武振波. FSS 隐身雷达罩电性能理论分析的基本问题研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2004.
WU ZH B. *Research on essential problems of electrical performance analysis for FSS stealth radome*[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [7] 高艳茹. 无粘接剂挠性覆铜箔聚酰亚胺薄膜技术要求[J]. *印刷电路信息*, 2002, (8): 52-54.
GAO Y R. Technical requirement for adhesiveless flexible copper-clad polyimide film[J]. *Printed Circuit Information*, 2002(8): 52-54. (in Chinese)
- [8] 沈锡宽. 印制电路技术[M]. 北京:科学出版社, 1987.
SHEN X K. *Technology of Printed Circuit Board*[M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [9] 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 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] CALLAGHAN P, PARKER E A, LANGLEY R J. Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces[J]. *IEE Proceedings-H*, 1991, 138(5): 448-454.

作者简介:蒙志君(1982—),男,湖北监利人,博士研究生,主要从事飞行器隐身技术的研究。E-mail: amengzj@ase.buaa.edu.cn

武哲(1957—),男,山西太原人,教授,博士生导师,主要从事飞机总体设计技术,隐身技术及相关领域的研究。E-mail: wuzhe@buaa.edu.cn