

基于增材工艺的柔性带通频率选择表面

程 开,黄贤俊,梁圆龙,徐延林,田 涛,刘继斌,刘培国

(国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 本文提出了一种基于增材加工工艺的带通频率选择表面设计. 传统频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)通常由PCB(Printed Circuit Board)工艺加工实现,难以与大面积柔性覆盖等场合兼容. 为此,本文提出了基于丝网印刷与电镀的增材加工方法实现对带通频率选择表面的加工,并通过一种螺旋风车形缝隙结构带通 FSS 设计进行验证. 设计与测试表明,实现的带通 FSS 在 C 波段提供了 6 ~ 8GHz 的通带,带内最小插损 2.48dB. 该 FSS 表现出良好的机械柔性,并在 0 ~ 60°宽角度入射波,以及不同极化条件下,表现出稳定的频率选择特性. 这一宽角度与极化稳定性对于柔性 FSS 在共形覆盖条件下应用不可或缺. 相较于传统 PCB 工艺,本文提出的基于增材工艺带通 FSS 不但成本低、加工效率高,还具有柔性共形、极化与宽角度稳定等优势,有望满足柔性覆盖/共形电磁兼容与防护的需求.

关键词: 柔性频率选择表面; 增材工艺; 宽角度稳定; 电磁兼容

中图分类号: TN011.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1204-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200660

Flexible Band-Pass Frequency Selective Surface Based on Additive Patterning and Electroplating

CHENG Kai, HUANG Xian-jun, LIANG Yuan-long, XU Yan-lin, TIAN Tao, LIU Ji-bin, LIU Pei-guo

(School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: A band-pass frequency selective surface (FSS) design based on additive processing is presented. The traditional FSS is usually processed by PCB (Printed Circuit Board) technology, which is difficult to be compatible with large-area flexible coverage. To this end, this paper proposes an additive processing method based on screen printing and electroplating to realize the processing of the band-pass FSS, and is verified by a design of band-pass FSS with spiral windmill-shaped slot structure. The design and experiment show that the realized band-pass FSS provides a pass-band of 6 ~ 8GHz in the C-band, and the minimum insertion loss is about 2.48 dB. The FSS exhibits good mechanical flexibility, and exhibits stable frequency selection characteristics under incident waves with a wide angle of 0 ~ 60° and different polarization conditions. This wide angle and polarization stability are indispensable in the application of flexible FSS under conformal coverage conditions. Compared with the traditional PCB process, the band-pass FSS based on additive process proposed not only has low cost and high processing efficiency, but also has the advantages of flexible conformal, polarization and wide-angle stability. It is expected to meet the need for flexible coverage/conformal electromagnetic compatibility and protection.

Key words: flexible FSS (Frequency Selective Surface); additive patterning; wide-angle stability; electromagnetic compatibility

1 引言

频率选择表面(FSS)是一种二维周期阵列结构^[1],具有空间电磁滤波功能.随着电磁兼容与防护、隐身、抗干扰等领域对FSS需求的快速发展,其功能逐渐多样

化,结构也更加复杂^[2-7].目前,FSS大多采用传统PCB^[8]工艺加工,成品多为刚性结构,难以在目标上实现柔性共形.同时,PCB工艺加工面积小,无法满足大尺寸FSS批量生产的需求.

为实现柔性FSS的加工,研究人员采用了以PI

(Polyimide)膜为基底的柔性 PCB 工艺^[9]. 柔性 PCB 克服了传统的 FR4 等硬质 PCB 不可弯曲的缺点,且以铜等金属作导电材料,因此加工的带通 FSS 插入损耗较低. 然而,柔性 PCB 加工稍大尺寸的 FSS 成本更高,可加工的面积有限,无法满足覆盖形 FSS 的加工需求.

为解决 PCB 工艺大面积低成本加工 FSS 的难题,研究人员尝试了喷墨打印、刺绣、丝网印刷等增材工艺制备柔性 FSS. 喷墨印刷是按照数字化图片输入,喷印出功能性油墨,实现图案化的一种加工方式^[10]. Zabri 采用喷墨打印,实现了 9 ~ 18GHz 的带阻型 FSS. 喷墨打印精度高,但是喷印效率较低,在加工大图案时会耗时高,并不适用于 FSS 的批量化生产. 电脑刺绣是一种依据预设程序,使用导电丝在布匹等材料上绣制 FSS 图案的工艺. 吕志蕊^[11]等人采用了电脑刺绣工艺制备了一款轻薄的柔性带阻型 FSS,频率为 15.4GHz 时,对波的衰减达到了 -20dB. 该工艺成本低廉,但是加工精度和加工效率低下. 同时由于绣线难以构成大面积的缝隙结构,因此该工艺不适用于带通 FSS 的加工. 相比之下,丝网印刷^[12]作为电子线路、医疗传感、纺织等行业广泛采用的一种加工方式,具有价格低,效率高,可以大面积加工的优点. 随着丝网印刷制版工艺与机械控制技术的不断提升,其加工精度不断提高,达到数十微米,可有效满足微波波段图案化加工^[13,14].

带通 FSS 作为 FSS 的重要类别,在电磁防护材料、隐身雷达罩等领域中有着不可替代的作用. 为此,本文以柔性带通 FSS 设计与增材加工为目标,充分利用丝网印刷工艺成本低,效率高,精度好的优点,结合增材电镀,形成基于增材加工的柔性带通 FSS 工艺. 实验结果表明,设计的 FSS 在 C 波段实现 6 ~ 8GHz 的通带,带内最小插损约为 2.48dB. 同时,该 FSS 表现出良好的柔性以及柔性 FSS 必备的宽角度稳定性. 在 0 ~ 60°大角度入射波,以及不同极化入射波条件下,所研 FSS 均保持了稳定频率选择响应. 相较于传统 PCB 工艺,本文提出的基于增材工艺的柔性带通 FSS 不但成本低、加工效率高,还具有柔性共形、极化与宽角度稳定等优势,有望实现柔性带通 FSS 的大面积加工与应用,有效满足电磁兼容、伪装隐身等领域需求.

2 柔性带通 FSS 设计和增材工艺制备

2.1 柔性带通 FSS 设计

在 FSS 的应用中,入射波角度与极化的稳定性是非常重要的性能要求. 尤其对于柔性共形 FSS,入射波相对于不同位置的 FSS 其入射角是不同的,因此柔性共形应用对于 FSS 的角度稳定性提出了更高的要求. 平面缝隙阵列是带通 FSS 的常用设计,其具有结构简单、原理清晰、易于平面加工的优点. 对带通 FSS 而言,栅瓣现

象可严重影响其带内性能,因此需要在工作频段内尽量避开栅瓣或削弱栅瓣效应产生的影响. 栅瓣最低产生频率越高、离 FSS 通带越远,其对 FSS 稳定性影响越小^[15]. 由 FSS 的基础理论可知,FSS 单元电尺寸越小,其带来栅瓣再频率上延迟出现以及角度稳定性提高等优势. 根据 B. Munk 提出的理论,FSS 出现栅瓣的条件为

$$\beta \cdot D_x (\sin\eta + \sin\eta_g) = 2\pi n \quad (1)$$

式(1)中

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (2)$$

其中, η 表示入射波的入射角, η_g 表示产生栅瓣的散射波和法线的夹角, λ_g 表示产生栅瓣的频率对应的波长, D_x 表示柔性带通 FSS 单元的尺寸. $n = \pm 1, 2, 3, 4, \dots$.

通过式(1)、(2)可得,栅瓣出现的频率 f_g 为

$$f_g = \frac{c}{\lambda_g} = \frac{nc}{D_x (\sin\eta + \sin\eta_g)} \quad (3)$$

当散射波掠过阵列(即 $\eta_g = 90^\circ$)时,其对应栅瓣出现的频率为

$$f_{g0} = \frac{nc}{D_x (\sin\eta + 1)} \quad (4)$$

在式(4)中,当 $n = 1$ 时

$$f_{g0} = \frac{c}{D_x (\sin\eta + 1)} \quad (5)$$

是出现栅瓣的最低频率.

由以式(3)~(5)可知,在入射角不变的情况下, D_x 越小,出现栅瓣的最低频率越高,离工作频段越远,从而避免了对工作频段的影响.

减小单元尺寸不仅有利于防止栅瓣对工作频段响应的干扰,还可提高对入射角稳定性. 根据 B. Munk 的理论,FSS 的工作频率受其自阻抗直接影响,当单元尺寸减小时,阵列自阻抗对入射角的敏感性会降低. 因此,减小单元尺寸可以降低入射角变化对 FSS 工作频率的影响,从而增强 FSS 的角度稳定性^[16].

综合以上理论分析可知,小单元尺寸不仅可减弱栅瓣干扰,同时提高了 FSS 角度稳定性. 本文提出并优化了一种改进十字缝隙的带通 FSS 设计,如图 1(b)所示. 在图 1(b)的设计中,为减小单元的尺寸提高角度稳定性,将十字缝沿单元边沿最大路径弯折,从而在有限单元尺寸内实现最长的等效缝隙. 同时,十字缝隙的每条缝均按以上原则进行顺时针方向弯折,形成中心对称结构,从而具备了极化稳定性. 经过优化,设计的带通 FSS 单元边长 $p = 4.0\text{mm}$,单元电尺寸为 $\lambda/8 @ 6.6\text{GHz}$,短缝隙长 $l = 2.13\text{mm}$,缝隙宽度 $w = 0.10\text{mm}$,横向缝隙 $m = 3.55\text{mm}$. 为保证 FSS 的柔性,所选用基材为柔性 PET (Polyethylene terephthalate) 材料,其厚度 $t = 0.10\text{mm}$,相对介电常数 $\epsilon_r = 3.4$.

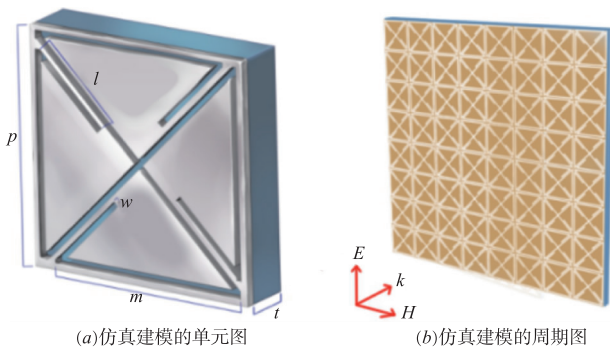


图1 带通FSS建模

2.2 柔性带通 FSS 增材制备

在以上带通 FSS 设计中, 缝隙最小宽度为 0.1 mm, 对加工精度提出了较高要求. 本文设计提出了一种基于增材工艺的带通 FSS 加工方法, 其流程如下图 2 所示. 所提出的增材加工流程主要包含丝网印刷、加热固化、增材电镀三个步骤.

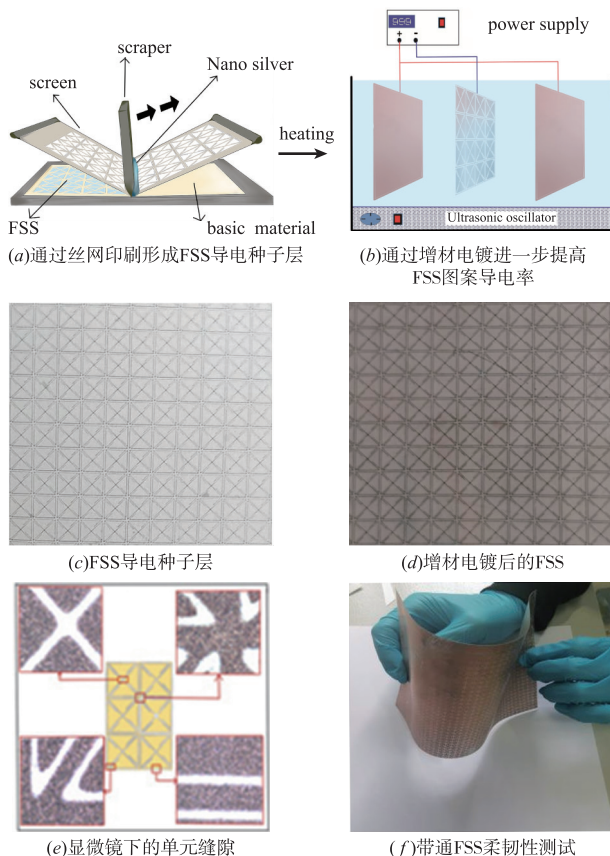


图2 基于丝网印刷与电镀的FSS增材加工流程

首先, 采用丝网印刷导电银浆形成 FSS 种子层, 如图 2(a) 所示. 依照如上图 1(b) 所设计的 FSS 单元周期图案加工成丝网印刷网版. 网版中, FSS 导电部分为镂空丝网, 导电银浆在刮刀的作用下从镂空处渗出到网版下方的 PET 基材上, 形成如图 2(c) 所示导电

图案. 由于丝网导电银浆添加了必备的非导电粘剂, 其导电率为 $0.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, 为纯银材料导电率的 $1/8$, 丝印后得到的方块电阻为 $0.37 \Omega/\square$. 对于带通 FSS, 这一导电率将导致带内插损的增加. 为进一步提高导电率从而降低带内插损, 如图 2(b) 所示在丝网印刷图案加热固化后(固化条件为 120°C 加热 20min), 再进行增材电镀. 电镀时, 以焦磷酸钾 280g/L, 焦磷酸铜 70g/L, 柠檬酸铵 15g/L 的电镀液, 镀液温度 45°C , pH 值 8.2. 以无氧铜板作为阳极, 银浆图案作为阴极, 电极间空气搅拌; 在阴极电流密度 1.5A 每平方分米的条件下进行电镀铜, 电镀 5min 后, 如图 2(d) 所示. 经电镀后银浆图案表面覆盖了一次均匀的铜层, 进一步提高了导电率, 其表面电阻从 $0.37 \Omega/\square$ 降低到 $0.16 \Omega/\square$. 基于以上增材工艺, 制备了边长为 280mm 的 FSS 样品. 图 2(e) 为 FSS 单元的十字缝隙中心处在显微镜 50 倍放大图, 由图可见该 FSS 中 0.1mm 的缝隙边界清晰, 证明了以上增材工艺流程具有较高的加工精度. 由于采用了 0.1mm 的柔性 PET 基材作为衬底, 且基于丝网印刷导电银浆的图案具有可弯折性, 因此形成的 FSS 整体具有较好的柔性, 如图 2(f) 所示. 综合可见, 以上提出的基于丝网印刷与电镀的增材工艺, 可实现较高精度的柔性带通 FSS 加工. 该增材工艺融合了丝网印刷与电镀这两种低成本、大面积、高效率的工艺, 在实际生产中可形成卷对卷连续加工, 有效解决大尺寸柔性 FSS 加工难题.

3 结果与讨论

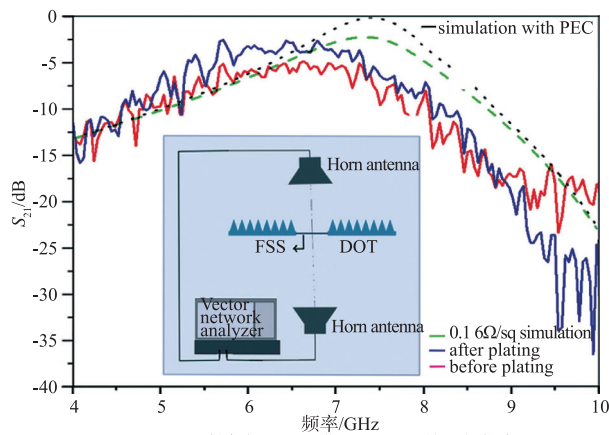
针对以上设计加工的柔性带通 FSS, 如下图 3 开展了其响应特性测试. 首先, 图 3(a) 给出了增材制备的 FSS 与仿真的对比, 测试采用吸波墙开窗法, 如插图所示. 在测试中, FSS 样品贴附于开窗的吸波墙上, 开窗略小于 FSS 大小以保证完全被 FSS 覆盖. 两个工作于 1GHz ~ 18GHz 的喇叭天线 (ANT1199) 分别作为发射与接收, 连接于矢量网络分析仪 (AV3672E).

如图 3(a) 所示, 给出了仿真与测试的对比, 首先比较电镀后 FSS 与仿真 ($R_s = 0.16 \Omega/\square$) 的性能, 可见两者具有较好的一致性, 制备的 FSS 在 5.2GHz ~ 8.3 GHz 形成通带. 同时, 比较电镀前与电镀后 FSS 可见, 在通带中心频段 (6.5GHz ~ 7GHz), 其带内插损降低了 2.2dB. 此外, 通过对比 PEC 与 $R_s = 0.16 \Omega/\square$ 的仿真可见, 所制备的 FSS 带内插损主要来源于 FSS 的的欧姆损耗, 而欧姆损耗的降低可以通过降低表面导电层的方阻实现. 依据方阻计算公式:

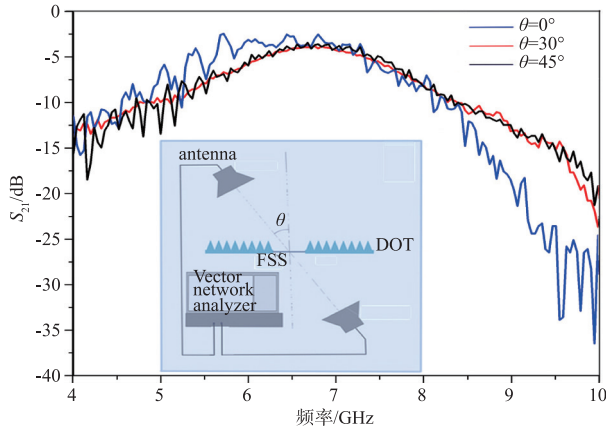
$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (6)$$

其中 R_s 为方阻, ρ 为材料电阻率, t 为材料厚度.

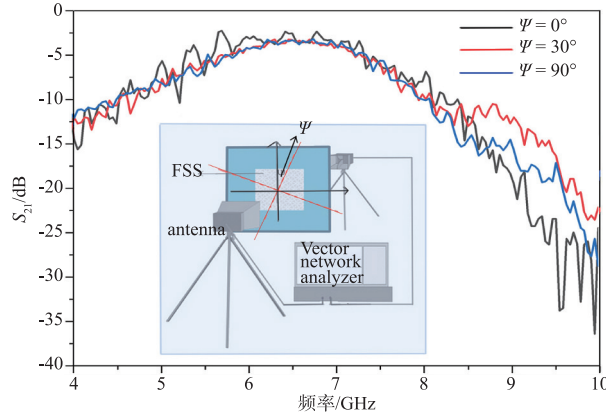
在电阻率不变的情况下, 随着材料厚度 t 增加, 方



(a)正入射条件下柔性带通FSS测试结果与仿真对比



(b)斜入射条件下柔性带通FSS角度稳定性测试与结果

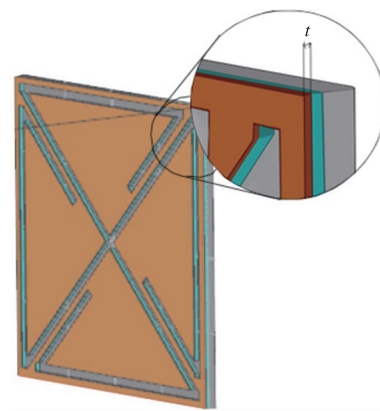


(c)柔性带通FSS的极化稳定性测试与结果

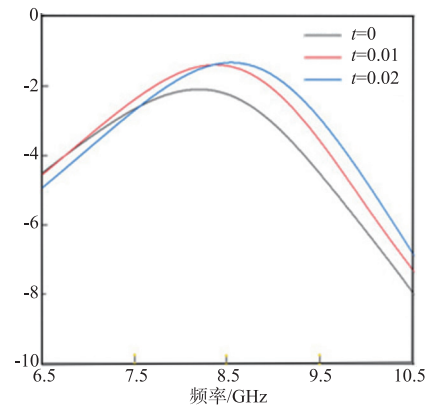
图3 柔性带通FSS性能测试方法与结果

阻将降低,从而使插损降低.如图4(b)所示,仿真了不同镀层厚度下透射系数的变化,令镀层厚度为 t 毫米,清楚地发现增加镀层厚度可进一步降低插损.综上所述可知,欧姆损耗可通过采用更高导电率的银浆、提高电镀铜的厚度等方式降低.

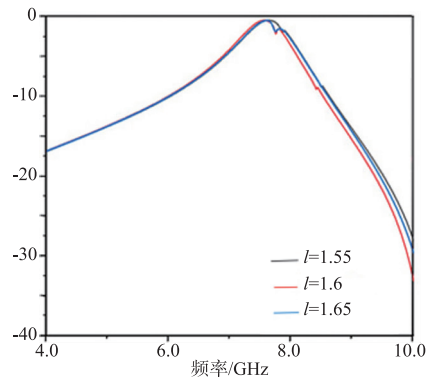
为探讨加工精度对于性能的影响,仿真了不同缝隙宽度 w 和不同短缝隙长度 l 下的 FSS 透射系数,结果如上图图4(c),(d)所示.可以发现,本结构对误差的容忍性比较好,在受加工精度影响导致缝隙尺寸发生



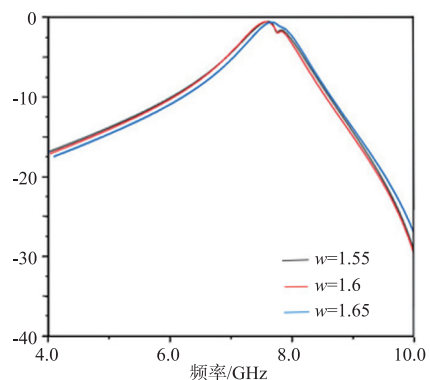
(a)电镀层厚度为 t 时的仿真建模



(b)不同镀层厚度下的插损对比



(c)不同缝隙长度下 S_{21} 对比



(d)不同缝隙宽度下 S_{21} 对比

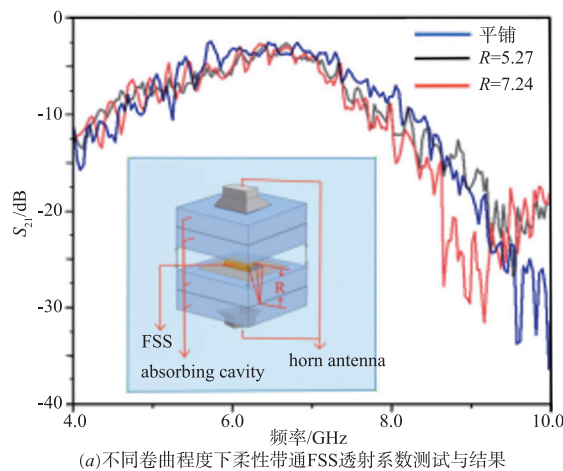
图4 不同镀层厚度下柔性带通FSS透射系数变化

变化时,其通带性能基本不变.如上文 1.1 所述,对于柔性 FSS 而言,入射角度及极化稳定性在应用中非常重要.如图 3(b)给出了该带通 FSS 角度稳定性测试设置及结果.同样的,样品被放置于吸波墙窗口,发射与接收天线如图 3(b)插图所示成 θ 角.在不同的入射角 θ 下,测得带通 FSS 的响应.如图 3(b)中曲线可见,在测试的 $0 \sim 45^\circ$ 入射角范围内,其频率响应尤其是通带内响应,整体保持了高度一致性.具体的,当 $\theta = 0^\circ$ 时,10dB 通带约为 4.9GHz ~ 8.3 GHz,当 $\theta = 30^\circ$ 时,10dB 通带约为 5.2GHz ~ 8.3GHz,中心频率偏差为 2.2%,当 θ 增大到 45° 时,10dB 通带约为 4.6GHz ~ 7.8GHz,中心频率偏差为 6%.由此可见,提出的小型化柔性带通 FSS 设计具有宽角度稳定性.

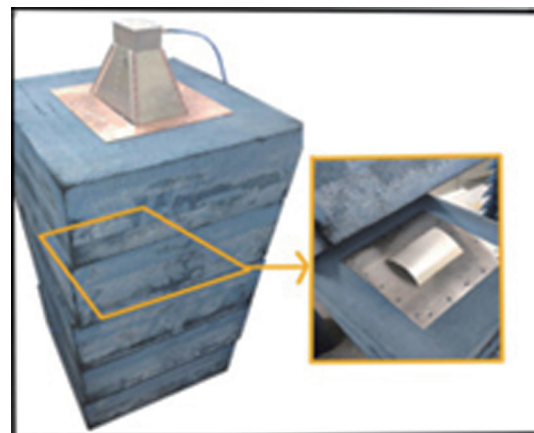
如图 3(c)给出了该带通 FSS 极化稳定性测试设置及结果.样品被放置于吸波墙窗口,并以样品中点为轴旋转,旋转角为 Ψ .在不同的极化方式下,测得带通 FSS 的响应.如图 3(c)中曲线可见,在测试的三种极化方式

下,其频率响应尤其是通带内响应,整体保持了高度一致性.具体的,当 $\Psi = 0^\circ$ 即入射波垂直极化时,10dB 通带约为 4.9GHz ~ 8.3GHz,当 $\Psi = 30^\circ$ 时,10dB 通带约为 4.7GHz ~ 7.8GHz,中心频率偏差为 5%,当 Ψ 增大到 90° 即水平极化时,10dB 通带约为 4.7GHz ~ 7.6GHz,中心频率偏差为 7%.由此可见,提出的小型化柔性带通 FSS 设计具有极化稳定性.

为了为验证卷曲后的 FSS 性能,测试了不同卷曲程度下的 FSS 的透射系数.结果如图 5 所示.可以发现:对于平铺,半径 $R = 5.27\text{mm}$ 卷曲和半径 $R = 7.24\text{mm}$ 卷曲三个状态下的 FSS 进行实验测试,测得其通带均位于 5GHz ~ 8GHz,中心频率均为 6.5GHz.可以认为卷曲对本文所提出的 FSS 基本无影响.综上可见,通过增材加工工艺加工的 FSS 仿真与测试表现高度的一致性,同时所设计的 FSS 具有宽角度以及极化稳定性,可有效满足共形覆盖等应用对柔性 FSS 的要求.



(a) 不同卷曲程度下柔性带通 FSS 透射系数测试与结果



(b) 卷曲条件下 FSS 透射系数测试场景

图5 不同卷曲程度下的 FSS 的透射系数测试场景与测试结果

4 结语

本文设计提出了一种柔性带通 FSS 的增材加工方法,通过可低成本、大面积加工的丝网印刷、电镀等增材工艺,验证了柔性带通 FSS 高精度加工的可行性.试验表明,所设计的柔性 FSS 在 C 波段具有带通频率选择响应,与仿真保持一致.更重要的是,得益于单元小型化设计,试验验证了该柔性带通 FSS 的宽角度入射稳定性、极化稳定性等重要性能,可有效适应柔性共形覆盖等应用场景.综上可见,本文提出的柔性带通 FSS 设计及其加工方法,解决了大面积、低成本柔性 FSS 加工与设计难题,为柔性 FSS 在电磁兼容与防护、电磁伪装隐身等领域应用提供了有益借鉴.

参考文献

- [1] Mittra R, Chan C H, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces—a review [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 76(12): 1593 – 1615.
- [2] Sarabandi K, Behdad N. A frequency selective surface with miniaturized elements [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2007, 55(5): 1239 – 1245.
- [3] Romeu J, Rahmat-Samii Y. Fractal FSS: A novel dual-band frequency selective surface [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1999, 48(7): 1097 – 1105.
- [4] Huang J, Wu T K, Lee S W. Tri-band frequency selective surface with circular ring elements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(2): 166 – 175.
- [5] Pozar D M, Pous R. A frequency selective surface using ap-

- erture coupled microstrip patches [A]. Antennas & Propagation Society International Symposium [C]. Salt Lake City, USA; Institute of Electric and Electronic Engineer, 1990. 96 – 99.
- [6] Mias C. Varactor-tunable frequency selective surface with resistive-lumped-element biasing grids [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2005, 15 (9): 570 – 572.
- [7] Zhang J H, et al. Energy selective surface with power-dependent transmission coefficient for high-power microwave protection in waveguide [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67 (4Pt. 2): 2494 – 2502.
- [8] 吕明云, 祝明, 王焕青, 等. 复杂曲面 FSS 加工系统研究 [J]. 航空学报, 2005, 26 (4): 524 – 527.
- [9] Yong W Y, Rahim S K A, Himdi M, et al. Flexible convoluted ring shaped FSS for X-band screening application [J]. IEEE Access, 2018, 6 (99): 11657 – 11665.
- [10] Zabri S N, Cahill R, Conway G, et al. Inkjet printing of resistively loaded FSS for microwave absorbers [J]. Electronics Letters, 2015, 51 (13): 999 – 1001.
- [11] 吕志蕊, 唐章宏, 徐欣欣, 等. 柔性频率选择表面的制备和传输特性 [J]. 安全与电磁兼容, 2014, (129): 79 – 81.
- [12] 孟超. 宽带电阻型 FSS 吸波材料设计与研究 [D]. 南京: 南京大学电子科学与工程系, 2015. 1 – 24.
- [13] Huang X, Lin M, Wu Z, et al. Screen overprinted flexible radar absorber composed of planar resistor loaded meta-materials [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, PP (99): 1 – 1.
- [14] Huang X, Leng T, Zhang X, et al. Binder-free highly conductive graphene laminate for low cost printed radio frequency applications [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106 (20): 105 – 203.
- [15] Munk, Ben A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design [M]. New York, USA: A Wiley Interscience Publication, 2005. 20 – 21
- [16] Munk, Ben A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design [M]. New York, USA: A Wiley Interscience Publication, 2005. 87 – 88

作者简介



程 开 男, 1995 年出生, 山东德州人, 硕士, 研究方向为: 电磁兼容与防护。
E-mail: 752386808@qq.com

黄贤俊 (通讯作者) 男, 1989 年出生, 江西萍乡人, 副研究员, 研究方向为: 电磁防护与柔性电磁材料。
E-mail: huangxianjun@nudt.edu.cn