



·高功率微波技术·

电磁屏蔽用低频比小型化双频带频率选择表面*

张靖晗, 闫丽萍, 黄钰, 赵翔

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 为满足敏感电子设备对频段密集相邻干扰信号的屏蔽需求, 提出了一种低频比双频段带阻频率选择表面(FSS)结构。该结构由介质层和印刷在其两侧并谐振在不同频率的金属导带层构成。通过对两侧金属导带的互补型设计, 削弱了两个谐振点间的耦合影响, 使该 FSS 结构具有两个可以独立调节且紧密相邻的阻带, 呈现出低频比特点。仿真结果表明, 此结构可以实现低至 1.16 的谐振频率比。基于弯折结构的小型化设计使该 FSS 的单元尺寸仅为 0.071λ , 确保所提结构在 TE 和 TM 两种极化电磁波照射下, 电磁屏蔽效能大于 24 dB 的入射角度稳定性高达 60° 。制作了实物并进行测试, 实测结果与仿真结果吻合良好, 验证了 FSS 结构设计的可靠性。

关键词: 频率选择表面; 电磁屏蔽; 小型化; 低频比; 角度稳定性

中图分类号: TN03 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210044

A miniaturized dual-band frequency selective surface with low frequency ratio for electromagnetic shielding

Zhang Jinghan, Yan Liping, Huang Yu, Zhao Xiang

(College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A miniaturized dual-stopband frequency selective surface (FSS) is proposed in this paper to shield the sensitive electronic equipment from interference signals with closely spaced frequency bands. The proposed FSS composes of a dielectric layer and two metal strip layers printed on both sides of the dielectric substrate. Different from other dual-band FSSes, the coupling between the double metal strip layers of the proposed FSS is weakened intentionally by using the complementary design of the strip patterns. As a result, the proposed FSS has two independently tunable stopbands which are very closely spaced. The simulated results show that the operating bands of the proposed FSS structure can achieve a frequency ratio as low as 1.16. In addition, the miniaturized design by using the convoluted elements makes the dimension of the unit cell as small as 0.071λ , where λ is the wavelength of the lower resonant frequency in free space. This ensures that the proposed FSS has incident angular stability of up to 60° for both TE and TM polarizations, while keeping at least 24 dB shielding effectiveness at the same time. The prototypes of the proposed FSS are fabricated and tested. Good agreements are achieved between the measurement and simulation, which demonstrates the reliability of the simulation.

Key words: frequency selective surface; electromagnetic shielding; miniaturization; low frequency ratio; angular stability

现代战争中网电一体化的对抗方式, 对武器装备的电磁防护设计带来了新挑战^[1-2]。电磁屏蔽技术是一种常用的防护手段, 通常是使用金属外壳对需要保护的设备进行全频段屏蔽。然而在部分应用场景中, 这种屏蔽措施因为在抵挡电磁攻击的同时阻断了设备的信号收发而无法使用^[3], 相比之下频率选择表面(FSS)作为一种空间滤波器, 根据频率不同对空间电磁波具有选择透过性, 因此不仅在天线罩^[4-5]、天线反射面^[6]、微波吸收体^[7]等领域得到广泛应用, 近年来也开始得到电磁屏蔽领域研究人员的关注^[8-9]。随着多功能电子设备以及无线技术的不断发展, 单一谐振频率的 FSS 结构已经无法满足实际需求, 尤其是像卫星导航和基站这类系统的工作频带十分紧凑, 这对

* 收稿日期: 2021-02-05; 修订日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61877041); 成都市科技项目(2020-GH02-00061-HZ)

作者简介: 张靖晗(1996—), 女, 硕士, 主要从事应用于电磁屏蔽的频率选择表面的研究。

通信作者: 闫丽萍(1972—), 女, 教授, 主要从事电磁兼容建模分析与电磁效应评估方面的研究。

FSS 的设计提出了新要求,因此人们对频带紧密相邻(即低频比)的 FSS 结构进行了较深入的研究^[10-17]。2008 年, Xu Rongrong 等人通过加载集总电容,实现了谐振在 2.5 GHz 和 3.5 GHz 的频率选择表面^[10]; Sivasamy R^[13] 和 Chen Sihong^[15] 带领团队,成功设计了频比低至 1.39 和 1.15 的双频带 FSS 结构。在实际应用中,无论是为了在有限的空间中容纳更多的 FSS 单元结构,还是为了抑制栅瓣提高角度稳定性,都要求 FSS 结构的小型化设计。Ghosh S^[14], Hong Tao^[16] 和 Chen Tong^[17] 等团队通过设计弯折的多电流路径结构,获得了频带紧密且单元结构紧凑的双频带频率选择表面,且具有较好的角度稳定性。这些研究为低频比与小型化 FSS 结构设计提供了有益参考。然而,这些研究大多为单层结构,即通过一个导电层实现两个谐振频率,这一方面限制了结构的进一步小型化;另一方面,两个谐振点间耦合影响较大,难以实现独立调节。因此,研究频带紧密且可以独立调节各阻带中心频率的多频段小型化频率选择表面,在民用和军事领域都具有重要意义。

本文提出了一种基于双面互补结构的双频段带阻 FSS 结构,这种互补型设计削弱了两个阻带谐振点间的耦合影响,使所设计 FSS 结构呈现出很好的频带隔离性。结果表明,所设计结构不仅具有两个可以独立调节且紧密相邻的阻带,而且具有小型化、极化独立和高达 60° 的入射角度稳定性等优点。

1 仿真设计

频率选择表面(FSS)是一种由特定单元(导电贴片或缝隙)组成的无限大周期结构,对特定频段下的电磁波具有反射、透射或者吸收的功能^[18]。在本文的仿真计算中,采用 Floquet 边界模拟 FSS 周期结构。

1.1 互补型 FSS 结构设计

本文提出的互补型 FSS 单元结构如图 1 所示,其单元尺寸为 a ,由介质层和印刷在介质基板两侧的金属导电层构成。介质层厚度为 t ,由相对介电常数为 4.3、损耗角正切为 0.025 的 FR4 基板构成。该 FSS 的正面金属贴片如图 1(a)所示,将普通十字单元演化为如图所示的弯折设计,使 FSS 结构在单元尺寸不变的情况下获得更长的感应电流路径,从而增大等效电感,降低谐振频率,实现小型化设计。正面金属条带的宽度为 w_1 ,最小条带间距为 w_2 。图 1(b)给出了该 FSS 单元的背面金属贴片,其金属条带宽度为 w_2 ,最小条带间距为 w_1 。反面贴片是基于正面贴片的互补结构演化而来,它们重叠在一起形成如图 1(c)所示的图案。为了更清晰地展示该双面互补的 FSS 单元结构,图 2 给出了单个单元和多个单元的透视图。该 FSS 的两层贴片均为关于单元中心的 90° 旋转对称结构,因此具有很好的极化独立性。

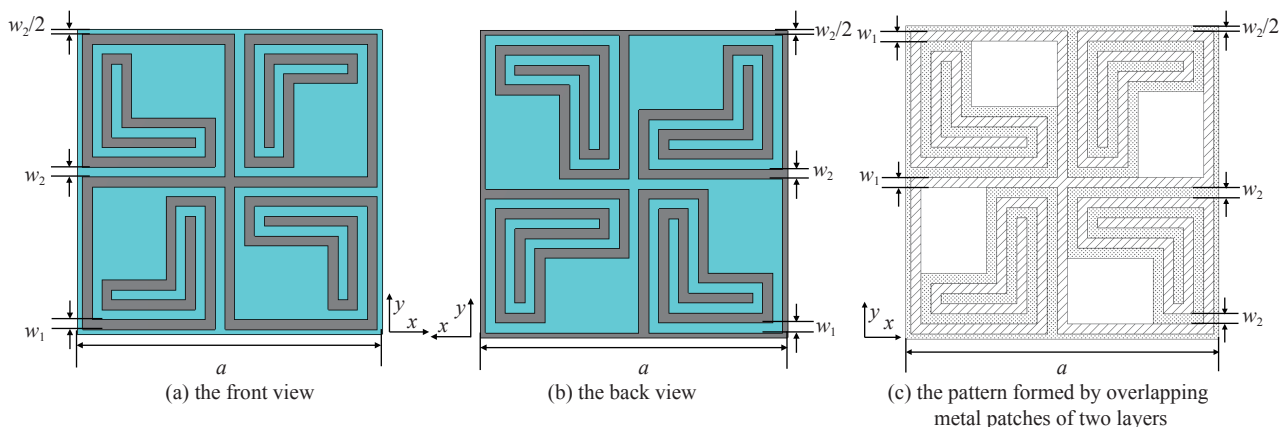


Fig. 1 Unit cell structure of the double-layer complementary FSS

图 1 互补型 FSS 的单元结构图

图 1 和图 2 中双面互补 FSS 的具体设计参数如表 1 所示。该 FSS 的两侧金属各提供了一个 LC 谐振回路,且双面互补的设计削弱了两个谐振点间的耦合影响,带来了良好的阻带设计独立性。图 3 给出了入射电磁波垂直照射情况下,单面 FSS 以及组合双面 FSS 的 $|S_{21}|$ 仿真结果对比图。从图中可以看出,正面贴片提供的谐振频率为 3.13 GHz,反面为 4.04 GHz,两者组成的双面 FSS 提供了 3.08 GHz 和 4.01 GHz 的双频谐振。与两个单面 FSS 相比,谐振频率的偏差仅为 1.6% 和 1.0%。仿真结果表明,该互补组合的双面 FSS 可以保持良好的谐振独立性及频率隔离性,这对实际设计与应用至关重要。

表 1 双面互补 FSS 的具体设计参数

Table 1 Parameter values of the proposed FSS

a/mm	w_1/mm	w_2/mm	t/mm
6.2	0.2	0.2	1.6

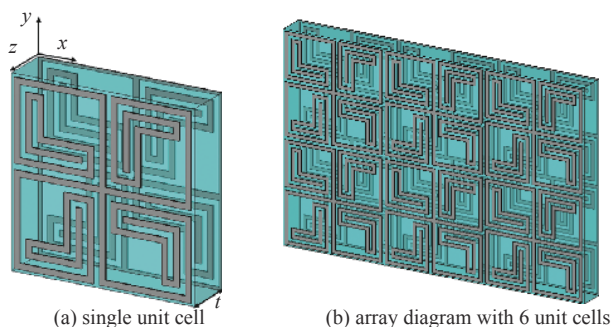


Fig. 2 The perspective view of the proposed FSS
图 2 互补型 FSS 结构透视图

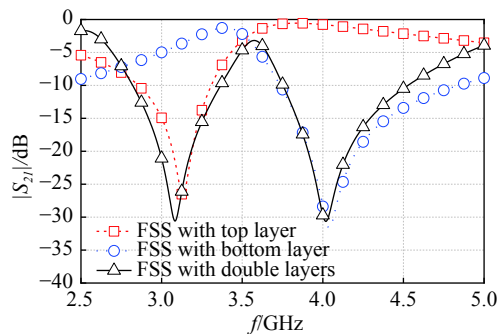


Fig. 3 Simulated $|S_{21}|$ of FSS for normal incidence
图 3 FSS 结构在垂直入射下仿真的到的 $|S_{21}|$ 值

1.2 低频比的优化结构设计

上面提出的互补型 FSS 结构具有良好的谐振独立性, 意味着可以通过调节两侧金属贴片来分别调节两个谐振频点, 进而实现更低频比的双频谐振。以提高低谐振频率为例, 由图 3 可知, 低频谐振由正面金属贴片产生, 因此可以通过缩短电流路径来提高谐振频率。最终优化单元结构如图 4 所示, 由于反面金属贴片保持不变, 且所给设计参数同表 1, 因此图 4 只给出了优化 FSS 单元结构的主视图和透视图。垂直入射情况下优化后单面 FSS 和双面 FSS 的散射参数 $|S_{21}|$ 值的比较见图 5。可以看出该优化结构依然保持着良好的谐振独立性及频率隔离性。对比图 3 和图 5 可知, 调节低阻带的谐振频率从 3.08 GHz 到 3.45 GHz 后并不会对高阻带的谐振频率 4.01 GHz 产生影响, 实现了阻带独立调节且紧密相邻的双频段 FSS 结构。

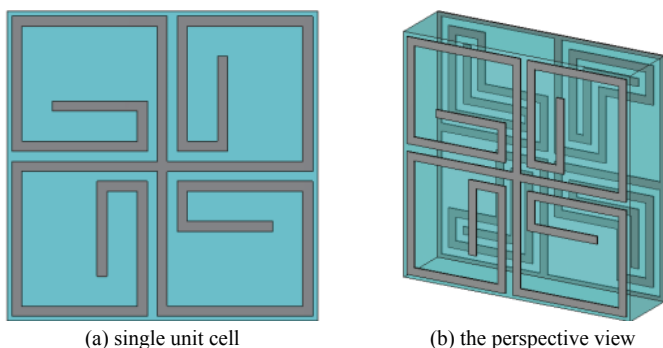


Fig. 4 Unit cell structure of the optimized FSS
图 4 优化 FSS 的单元结构图

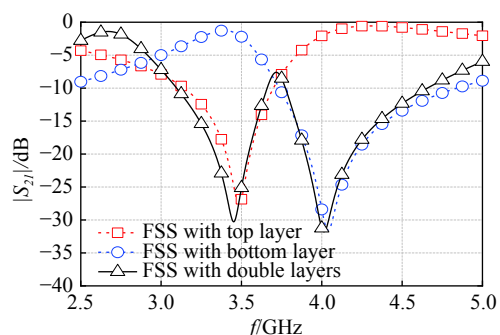


Fig. 5 Simulated $|S_{21}|$ of optimized FSS for normal incidence
图 5 优化后 FSS 结构在垂直入射下仿真的到的 $|S_{21}|$ 值

2 结果分析

考虑到实际应用中干扰电磁波的极化方式和入射方向不确定, 所设计的 FSS 结构应具有较好的极化和入射角度稳定性。这里分析计算了不同极化方式电磁波以不同角度入射到图 1 所示的原始互补型 FSS 结构以及图 4 所示的优化低频比 FSS 结构时的电磁屏蔽效能 (SE), 结果分别如图 6 和图 7 所示。

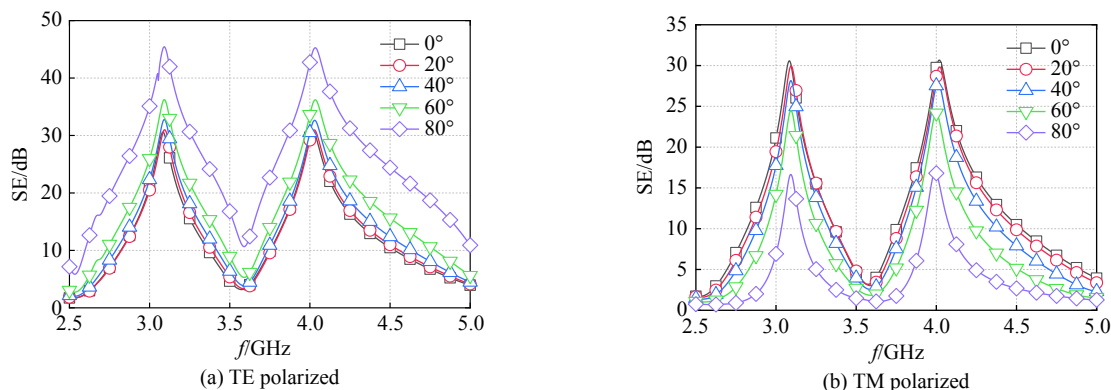


Fig. 6 Effect of incident angle on Shielding Effectiveness (SE) for different polarizations of the original FSS structure
图 6 原始 FSS 结构在不同极化方式下入射角度对屏蔽效能的影响

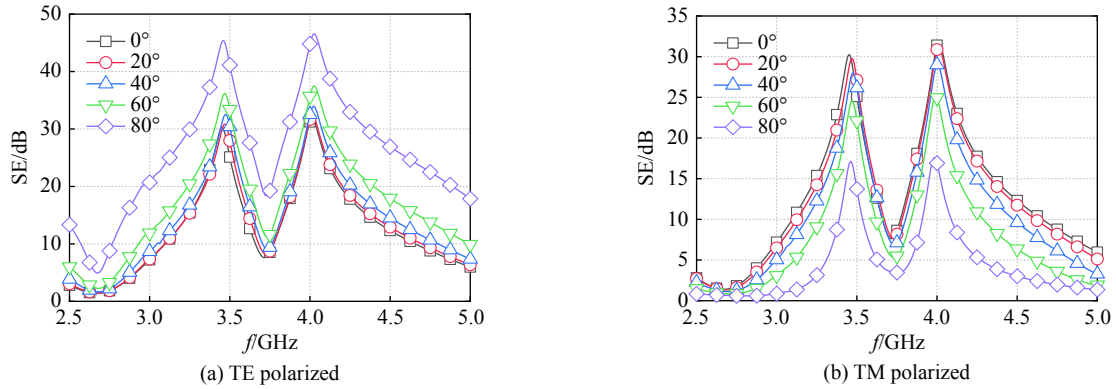


Fig. 7 Effect of incident angle on SE for different polarizations of the optimized FSS structure

图 7 优化 FSS 结构在不同极化方式下入射角度对屏蔽效能的影响

电磁屏蔽效能 SE 定义^[19]

$$SE = 20 \lg |E_0|/|E_s| \quad (1)$$

式中: E_0 表示没有屏蔽时空间某个位置的合成电场值; E_s 则表示屏蔽存在时该位置的合成电场值。因此, FSS 结构的电磁屏蔽效能为

$$SE = |S_{21}|_{\text{without FSS}}(\text{dB}) - |S_{21}|_{\text{with FSS}}(\text{dB}) \quad (2)$$

从图 6 和图 7 可以看出, 无论是 TE 极化还是 TM 极化电磁波, 本文提出的 FSS 结构屏蔽效能均满足 $SE \geq 24 \text{ dB}$, 且都具有高达 60° 的入射角度稳定性。当入射角大于 60° 时, 所提 FSS 的两个谐振频率仍保持稳定, 无较大偏移。但是 TM 极化的 SE 降低到 20 dB 以下, 屏蔽效能相对较差。

此外, 从图 7 还可以得到, 所提优化结构的谐振频率分别为 3.45 GHz 和 4.01 GHz, 频比仅为 1.16。该优化 FSS 的各项参数同表 1, 其单元尺寸为 6.2 mm, 即 0.071λ , 其中 λ 为低谐振频率 (3.45 GHz) 在自由空间中对应的波长。表 2 列出了本文提出的 FSS 与文献中报道的低频比双频 FSS 结构的比较, 表中以 f_L 和 f_H 分别表示低谐振频率和高谐振频率, λ 为对应 FSS 的 f_L 在自由空间中的波长。可以看出, 尽管文献 [15] 中所提结构具有更低的频比, 但单元尺寸较大; 文献 [14, 16-17] 的 FSS 更加小型化, 但频比较高。综上所述, 本文所提 FSS 同时兼顾了低频比和小型化, 且均达到了具有竞争力的指标。除此之外, 本文所提 FSS 结构可以灵活地独立调节谐振频率, 因此可以方便地扩展到更多应用中以满足不同电磁防护需求, 具有良好的实用性。

表 2 与其他低频比双频 FSS 的比较

Table 2 Comparison with the alternate dual-band FSSes with low frequency ratio

reference	f_L/GHz	f_H/GHz	f_H/f_L	dimension/ λ
Ref.[10]	2.5	3.5	1.4	0.082
Ref.[11]	4.0	7.0	1.75	0.125
Ref.[12]	2.5	3.5	1.4	0.080
Ref.[13]	2.54	3.54	1.39	0.088
Ref.[14]	2.35	3.05	1.29	0.065
Ref.[15]	5.55	6.38	1.15	0.268
Ref.[16]	1.59	1.96	1.23	0.042
Ref.[17]	1.04	1.49	1.43	0.039
proposed FSS	3.45	4.01	1.16	0.071

3 实验测试结果与分析

为了验证设计的可靠性, 加工并测试了图 1 和图 4 所示的两种互补型 FSS 结构。两种 FSS 样品尺寸均为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 由 30×30 个单元组成。图 8(a) 给出了实验系统框图, 其中发射天线和接收天线分别接在矢量网络分析仪的两个端口, 被测 FSS 以及环绕 FSS 的吸波材料放置在两个天线中间。实际测试系统和加工实物的局部示意图见图 8(b) 和 8(c)。由于加工的板子尺寸略小, 同时环绕的吸波材料剖面较高, 导致了当入射角度增大时, 入射波会

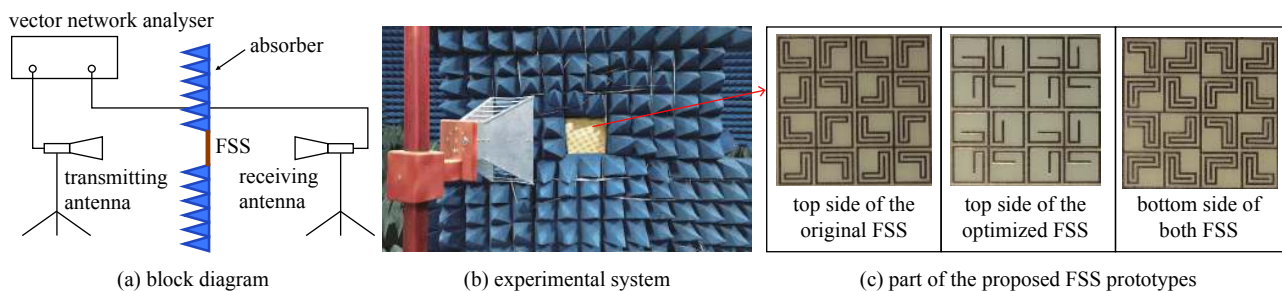


Fig. 8 Experimental system and part of the proposed FSS prototypes

图 8 实验测试系统以及加工实物的局部示意图

被吸波材料挡住而无法照射到 FSS 上。因此,图 9 中只展示了在入射角为 0° 和 20° 的两种极化波的照射下,两种 FSS 实测结果与仿真结果的对比。

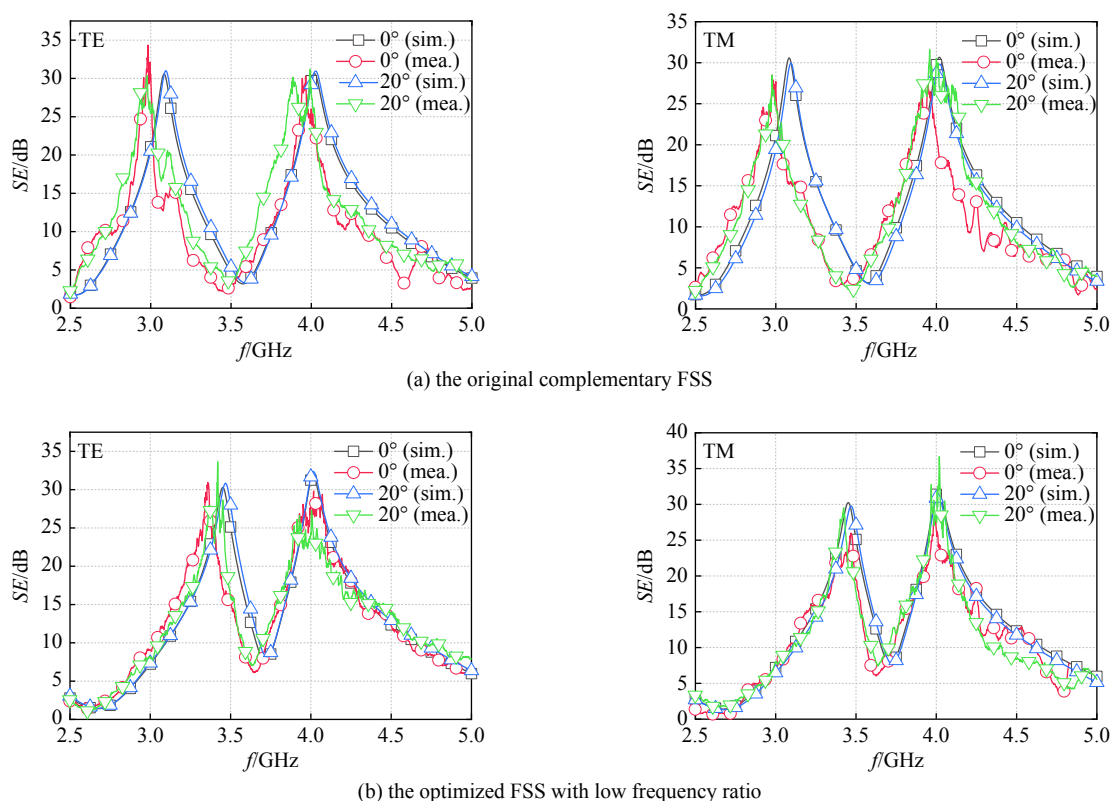


Fig. 9 Comparison of measured and simulated results of two fabricated FSSes for TE and TM polarizations under different incident angles

图 9 两种 FSS 在不同入射角度 TE 和 TM 极化波照射下实测结果与仿真结果的对比

从图 9 可以看出,无论是 TE 极化还是 TM 极化,实测结果均与仿真结果基本吻合。两种 FSS 样品的实测结果均存在一定的频偏,这一方面是因为加工的 FSS 结构和材料参数与仿真设计所用参数间存在微小差异引起的;另一方面是由实验中的人为因素造成的,包括收发天线中心没有完全对准、入射角度存在误差等。此外,实验中的电磁波并非均匀平面波,且实验中 FSS 结构及其周围吸波材料的绕射也会对实验结果带来影响,而实测结果中谐振点处的毛刺主要是由 FSS 结构及周边吸波材料的反射所致。

4 结论

本文提出了一种频带紧凑且可以各自独立调节的小型化双频段互补型频率选择表面结构,以满足复杂电磁环境下敏感电子设备的屏蔽需求。通过对两个谐振单元的互补型设计,削弱了谐振点间的耦合影响,提高 FSS 的频带隔离性,实现低至 1.16 的谐振频率比。基于弯折结构的小型化设计使该 FSS 单元尺寸仅为 0.071λ , 确保所提结构具有高达 60° 的角度稳定性。与文献中已有的低频比双频 FSS 结构相比,本文所提 FSS 结构除了兼顾低频比和小型化,还能够灵活地独立调节每个频段的谐振频率,具有良好的实用性。

参考文献:

- [1] 唐朝京. 网电对抗下的复杂电磁环境再认识[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103201. (Tang Chaojing. Recognition of complex electromagnetic environment under cyberspace countermeasures[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103201)
- [2] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. *高电压技术*, 2014, 40(6): 1605-1613. (Liu Shanghe, Liu Weidong. Progress of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(6): 1605-1613)
- [3] 杨成, 刘培国, 刘继斌, 等. 能量选择表面的瞬态响应[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 1045-1049. (Yang Cheng, Liu Peiguo, Liu Jibin, et al. Transient response of energy selective surface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 1045-1049)
- [4] Costa F, Monorchio A. A frequency selective radome with wideband absorbing properties[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(6): 2740-2747.
- [5] 强宇, 周东方, 刘起坤, 等. 一种新型宽带吸收频率选择表面[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103222. (Qiang Yu, Zhou Dongfang, Liu Qikun, et al. Novel absorptive frequency selective surface with wideband absorbing properties[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103222)
- [6] Chatterjee A, Parui S K. Performance enhancement of a dual-band monopole antenna by using a frequency-selective surface-based corner reflector[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 2165-2171.
- [7] Chakradhary V K, Baskey H B, Roshan R, et al. Design of frequency selective surface-based hybrid nanocomposite absorber for stealth applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(11): 4737-4744.
- [8] Yan Liping, Xu Liuliu, Zhao Xiang, et al. An angularly stable frequency selective surface with vent holes for 5G electromagnetic shielding[C]//2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2019: 366-369.
- [9] Zhang Jinghan, Yan Liping, Gao R X K, et al. A novel 3D ultra-wide stopband frequency selective surface for 5G electromagnetic shielding[C]//2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2020: 1-4.
- [10] Xu Rongrong, Zhao Huancheng, Zong Zhiyuan, et al. Dual-band capacitive loaded frequency selective surfaces with close band spacing[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 18(12): 782-784.
- [11] Joumayly M, Behdad N. Low-profile, highly-selective, dual-band frequency selective surfaces with closely spaced bands of operation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(12): 4042-4050.
- [12] Chiu Chengnan, Wang Wenyi. A dual-frequency miniaturized-element FSS with closely located resonances[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 163-165.
- [13] Sivasamy R, Kanagasabai M. A novel dual-band angular independent FSS with closely spaced frequency response[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(5): 298-300.
- [14] Ghosh S, Srivastava K V. An angularly stable dual-band FSS with closely spaced resonances using miniaturized unit cell[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(3): 218-220.
- [15] Chen Sihong, Pan Taisong, Lin Yuan. Flexible dual-band ultrathin FSS with ultra-close band spacing[C]//2018 International Symposium on Antennas and Propagation. 2018: 1-2.
- [16] Hong Tao, Wang Mengdan, Peng Ke, et al. Ultrathin and miniaturized frequency selective surface with closely located dual resonance[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(6): 1288-1292.
- [17] Cheng Tong, Jia Zhili, Hong Tong, et al. Dual-band frequency selective surface with compact dimension and low frequency ratio[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 185399-185404.
- [18] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. NewYork: John Wiley, 2000.
- [19] 许留留, 闫丽萍, 赵翔. 适用于5G电磁屏蔽的介质开孔型频率选择表面设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(4): 616-620. (Xu Liuliu, Yan Liping, Zhao Xiang. Design of a frequency selective surface with vent holes through substrate for 5G electromagnetic shielding[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(4): 616-620)