

文章编号 1004-924X(2022)07-0773-07

宽带复合耦合型频率选择表面

焦 健¹, 徐念喜², 陈 新², 高劲松³

(1. 长春师范大学 物理学院, 吉林 长春 130032;

2. 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;

3. 光电装备与仪器先进制造技术吉林省重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为满足具有稳定传输特性的低剖面、宽带频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)结构的需求,提出了一种基于复合耦合型结构的宽带FSS结构。基于相邻周期子单元间相位-振幅的相互调制作用,建立新型宽带FSS的物理模型。采用全波数值仿真方法分析新型宽带FSS的电磁传输特性,以及扫描角度对其电磁传输特性的影响。最后,采用印刷电路板技术制备500 mm×500 mm的实验样件,并利用自由空间法测试其传输特性。实验结果表明:该结构具有稳定传输的宽频带特性,其-3 dB带宽为8.85 GHz,阻带顶部平坦、边缘陡直性较好,具有较好的入射角度稳定性。相邻周期子单元间相位-振幅相互调制作用理论为展宽FSS工作带宽提供了新方法,基于该方法设计的新型宽带FSS结构具有潜在的工程应用价值。

关 键 词:频率选择表面;复合耦合型;宽阻带;电磁传输特性

中图分类号: TN957; TN761 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223007.0773

Broadband frequency selective surface based on composite coupling structure

JIAO Jian¹, XU Nianxi², CHEN Xin², GAO Jinsong³

(1. School of Physics, Changchun Normal University, Changchun 130032, China;

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

3. Jilin Provincial Key Laboratory of Advanced Optoelectronic Equipment and Instruments Manufacturing Technologies, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

Abstract: To meet the requirements of low profile and broadband frequency selective surface (FSS) structure with stable transmission characteristics, a novel broadband FSS based on composite coupling structure was proposed. Based on the phase-amplitude modulation between adjacent periodic sub-units, a novel broadband FSS model was established. Subsequently, its electromagnetic transmission characteristics and the influence of the scanning angle on its electromagnetic transmission characteristics were calculated using

收稿日期: 2021-09-16; **修订日期:** 2021-10-15.

基金项目: 长春师范大学自然科学基金青年教师培育计划项目(No. 004长师大自科合字[2019]); 长春师范大学博士科研启动经费项目(No. 001长师大BS[2020]); 国家自然科学基金资助基金(No. 61901437)

full-wave numerical simulations. Finally, an FSS prototype of $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ was fabricated using the printed circuit board (PCB) technology and tested using the free space method. The experimental results show that the proposed FSS structure has stable broadband characteristics, and its bandwidth at -3 dB is 8.85 GHz . The top of the stopband is flat and its edge is steep. The FSS also shows good incident angle stability. Based on phase-amplitude modulation theory, a novel method to broaden the working bandwidth of FSS is proposed. The novel broadband FSS structure designed by this method has potential engineering significance.

Key words: Frequency Selective Surfaces(FSS); composite coupling; wide stopband; electromagnetic transmission characteristic

1 引言

在当前信息化条件下,电磁波是信息的有效载体,实现电磁波的有效调控对隐身、通信等领域具有重要意义^[1-3]。频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)就是一种能够对电磁波进行调控的人工电磁材料,具有独特的滤波功能,广泛应用于雷达隐身和通信等领域^[4]。FSS也是新型武器装备隐身性能以及现有武器装备隐身性能改良的主要技术,广泛地应用于可见光、红外、毫米波和微波等波段^[5]。在军事、航空航天、卫星通信等领域,基于FSS的空间电磁波调控技术研究具有重要意义^[6]。

随着宽带和超宽带雷达的研发与应用,宽带通信需求增加,FSS的宽带特性需求也越来越迫切^[7-8]。近年来,精心设计FSS周期单元几何图形^[9-10]与多层FSS阵列级联^[11-12]一直是展宽FSS工作带宽最常用的两种方法,但是这两种方法会导致设计变量的增加,不仅带来设计与优化上的困难,还导致宽带FSS剖面高,使FSS在实际应用中遇到无法随形、难于贴附的问题。在应用空间受限、大曲率的情况下,难以获得稳定的电磁传输特性始终是FSS在实际应用中的技术难题。因此,具有稳定传输特性的低剖面、宽带FSS的理论研究具有重要的应用价值,可为FSS的实际工程应用提供理论支撑。

文献[13]通过调控周期单元与双层级联的方法使FSS在 $15.7\sim 22.95\text{ GHz}$ (7.25 GHz)内反射电磁波,其最优化结构的剖面为三层夹心结

构,即在一层厚度为 3.0 mm 的ROHACELL泡沫的两侧分别加载由厚度为 0.762 mm 的Cu-Clad 217 介质支撑的FSS层,该结构在入射角度为 30° 时具有较为稳定的传输特性,但却在剖面高度和入射角度稳定性方面存在限制,较难满足大曲率随形贴附的需求。文献[14]利用层叠槽线结构在 $8.15\sim 16.25\text{ GHz}$ (8.1 GHz)内形成了稳定的宽阻带特性,在入射角度为 60° 时表现出稳定的传输特性,但该FSS的实际剖面高度为 12.0 mm ,其应用容易受到空间、曲率的限制。

为实现具有稳定传输特性的低剖面、宽带FSS,本文从Y形单元构成的耦合型周期子单元出发,基于相邻周期子单元间相位、振幅相互调制的物理机理,设计了一种具有稳定传输特性的低剖面、宽阻带复合耦合型FSS(Composite Coupled FSS,CCFSS)结构。利用全波数值仿真方法计算其电磁传输特性,同时研究平面电磁波入射角度对其传输特性的影响。理论与测试研究表明:宽带CCFSS结构具有良好的入射角度稳定性,其设计能够为具有稳定传输特性的低剖面、宽带FSS设计提供借鉴。

2 模型建立与机理分析

2.1 宽带FSS模型建立

CCFSS结构模型如图1所示,该复合结构的周期单元由周期子单元1与周期子单元2相邻排布构成。其中,周期子单元1由腿长为 L_1 、腿宽为 w_1 的Y形贴片单元和腿长为 L_2 、腿宽为 w_2 的Y

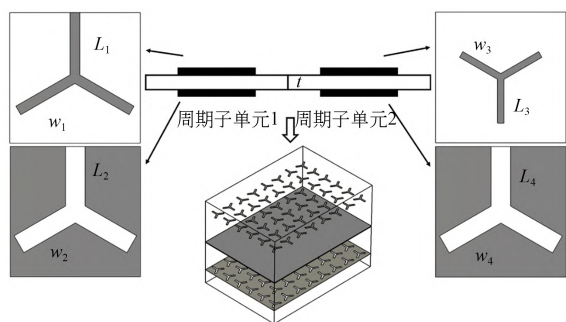


图1 宽带复合耦合型FSS的周期结构及阵列

Fig. 1 Unit cell and array of broadband composite coupled FSS

形孔径单元贴附在厚度为 t 、介电常数为 ϵ 的薄介质两侧构成。周期子单元2由腿长为 L_3 、腿宽为 w_3 的Y形贴片单元和腿长为 L_4 、腿宽为 w_4 的Y形孔径单元贴附在同种介质两侧构成。周期子单元1与周期子单元2具有相同的周期尺寸,即 $D_{1x}=D_{2x}=D_x$, $D_{1y}=D_{2y}=D_y$ 。因此,复合周期单元沿 x,y 方向的周期分别为 $2D_x,D_y$ 。需要说明的是,CCFSS以耦合型结构为基础,具备小型化特点,其周期间隔满足 $2D_x<\lambda/2$ 的条件。

2.2 频带展宽机理

FSS不仅可以对电磁场的振幅进行调控,还可以对其相位进行调控,因此FSS能够改变空间电磁场的能量分布。基于此,在目标频带内,若设周期子单元1的相位为 φ_{10} ,其散射场为 $\vec{E}_1=E_{10}e^{-i(\omega t+\varphi_{10})}\vec{i}$,与其相邻的周期子单元2的相位为

φ_{20} ,其散射场为 $\vec{E}_2=E_{20}e^{-i(\omega t+\varphi_{20})}\vec{i}$, $\nabla\varphi=\varphi_{20}-\varphi_{10}$,为相邻周期子单元间的相位差。

依据电磁场波动理论,周期子单元1与周期子单元2的散射场在空间某点 P 相遇时发生矢量叠加,即:

$$E=E_{10}e^{-i(\omega t+\varphi_{10})}+E_{20}e^{-i(\omega t+\varphi_{20})}. \quad (1)$$

因此, P 点处的电场能量为

$$I=E_{10}^2+E_{20}^2+2E_{10}E_{20}\cos(\nabla\varphi). \quad (2)$$

由式(2)可知,当相邻周期子单元间的相位差 $\nabla\varphi$ 为 180° 时,CCFSS相邻周期子单元间的散射场相干相消;当相邻周期子单元间的相位差 $\nabla\varphi$ 为 0° 时,CCFSS相邻周期单元的散射场相干相长。因此,当两周期子单元在目标频带内具有相同或相近的振幅时,在相邻周期子单元间引入 0° 或 180° 的相位差,即可实现展宽FSS工作带宽的目的。

基于上述理论,本文在前期研究工作^[15]的基础上提出了CCFSS结构。当TE极化波垂直入射时,在透波方向上,周期子单元1与周期子单元2的振幅和相位传输特性如图2示。由图2可知,在14~22 GHz内,周期子单元1与周期子单元2形成了较为稳定的相位差 $\Delta\varphi\approx 150^\circ$,即在该频带内两周期子单元的透射波近似反相。因此,基于前述理论可估测:由周期子单元1与周期子单元2构成的CCFSS至少在14~20 GHz内形成宽度约为6 GHz的阻带。

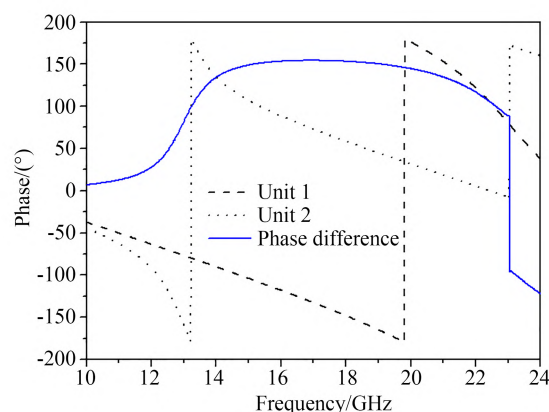
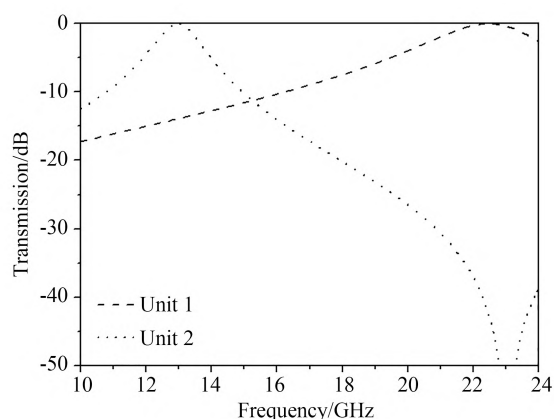


图2 周期子单元1与周期子单元2的振幅和相位传输特性

Fig. 2 Amplitudes and phase transmission characteristics of periodic subunits 1 and 2

3 电磁传输特性讨论

3.1 新型宽带 FSS 的电磁传输特性

采用全波数值分析方法计算图 1 所示的物理模型,周期子单元 1 与周期子单元 2 具有相同的周期间隔 $D_x=D_y=4.0$ mm, Y 形贴片单元与 Y 形孔径单元紧密贴附在厚度为 0.05 mm、介电常数为 3(正切损耗忽略不计)的薄介质两侧,周期子单元 1 和 2 的其他结构参数为: $L_1=2.0$ mm, $w_1=0.3$ mm, $L_2=2.0$ mm, $w_2=0.6$ mm, $L_3=1.4$ mm, $w_3=0.2$ mm, $L_4=2.0$ mm, $w_4=0.6$ mm。

当 TE 和 TM 极化平面电磁波垂直入射时,该宽带 CCFSS 在反射方向的电磁传输特性曲线如图 3 所示。由图 3 可知,当电场振动方向与 y 轴平行(TE)时,该结构的 -3 dB 带宽高达 9 GHz(13.33~22.33 GHz), -1 dB 带宽为 7.93 GHz(13.61~21.54 GHz);当电场振动方向与 x 轴平行(TM)时,该结构的 -3 dB 带宽可达 8.14 GHz(13.19~21.33 GHz), -1 dB 带宽为 7.12 GHz(13.36~20.48 GHz)。显然,全波数值计算得到的 CCFSS 的带宽在理论范围内,且该 FSS 结构的阻带顶部平坦,边缘陡直性较好。

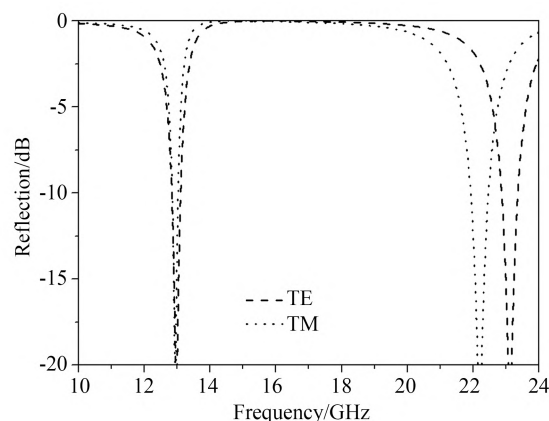


图 3 宽带 CCFSS 的电磁传输特性

Fig. 3 Reflection of broadband composite coupled FSS

3.2 扫描角度对电磁传输特性的影响

为验证 CCFSS 的入射角度稳定性,选取 CCFSS 的结构参数及周期单元间隔与 3.1 节保持一致,TE 和 TM 极化平面电磁波分别以不同角度入射时,CCFSS 的电磁传输特性曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,CCFSS 具有良好的入射角度稳定性,能够保持较好的平顶陡直特性。电磁波在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 扫描时,扫描角度对 CCFSS 电磁传输特性的影响较小,其带宽基本不变。扫描角度增加至 50° 时,无论是 TE 极化波入射,还是 TM 极化波入射,CCFSS 的带宽均减小,但仍能保证在 14~20 GHz 内具有良好的反射特性。

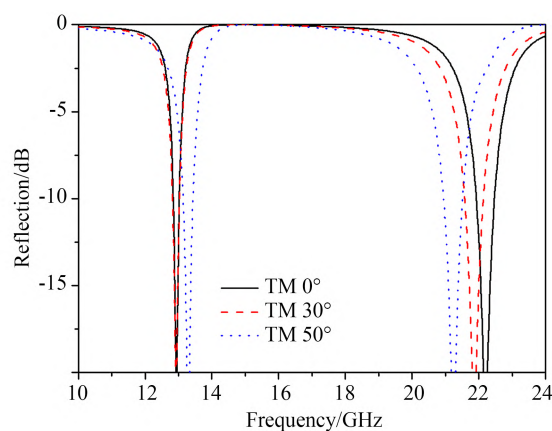
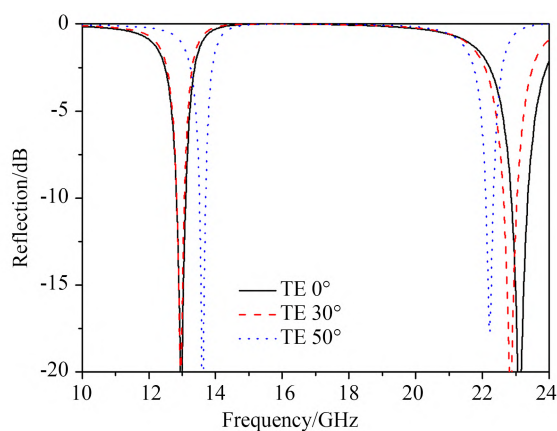


图 4 扫描角度对复合耦合型宽带 FSS 电磁传输特性的影响

Fig. 4 Influence of incident angle on reflection of composite coupled broadband FSS

4 实验

采用印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)技术制备了 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的CCFSS实验样件,实验样件各结构参数与本文第3部分保持一致。其中,Y形贴片阵列和Y形孔径阵列均由铜箔构成,耦合电介质为聚酰亚胺。该FSS的剖面高度主要由耦合电介质厚度决定,即剖面高度仅为 0.05 mm ,因此,其结构具有极低的剖面,易于随形贴附,具有薄、轻、柔的特性。

测试设备及实验样件如图5所示,测试频段为 $10\sim 24\text{ GHz}$,入射电磁波为TE极化波和TM极化波,入射角度分别为 0° , 30° 和 50° 。采用透波法在微波暗室进行测试,忽略耦合介质正切损耗,则CCFSS在 $10\sim 24\text{ GHz}$ 的反射特性可由反射率 $=1-\text{透射率}$ 导出。TE和TM极化波以不同角度入射时,该FSS在反射方向的电磁传输特性测试结果如图6所示。

当TE极化波分别以 0° , 30° 和 50° 入射时,CCFSS具有较为稳定的电磁传输特性。TE极化波以 0° 和 30° 入射时,该宽带FSS的电磁传输特性基本无变化, -3 dB 带宽为 8.85 GHz ($13.67\sim 22.52\text{ GHz}$), -1 dB 带宽为 7.56 GHz

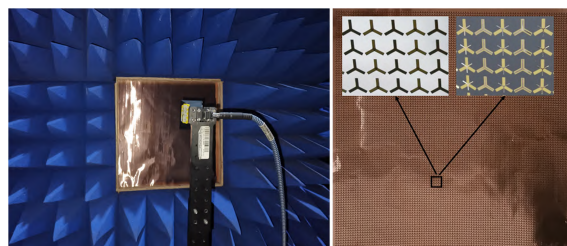


图5 测试设备和FSS样件

Fig. 5 Measurement setup and FSS sample

($14.04\sim 21.6\text{ GHz}$)。TE极化波以 50° 入射时,该宽带FSS的 -3 dB 带宽为 8.3 GHz ($13.67\sim 21.97\text{ GHz}$), -1 dB 带宽为 7.23 GHz ($14.04\sim 21.27\text{ GHz}$)。

当TM极化波分别以 0° , 30° 和 50° 入射时,该宽带FSS仍具有较为稳定的电磁传输特性。TM极化波以 0° 入射时,该宽带FSS的 -3 dB 带宽为 8.37 GHz ($13.08\sim 21.45\text{ GHz}$), -1 dB 带宽为 7.15 GHz ($13.34\sim 20.49\text{ GHz}$)。TM极化波以 30° 入射时,该宽带FSS的 -3 dB 带宽为 7.94 GHz ($13.08\sim 21.02\text{ GHz}$), -1 dB 带宽为 6.64 GHz ($13.34\sim 19.98\text{ GHz}$)。TM极化波以 50° 入射时,该宽带FSS的 -3 dB 带宽为 7.64 GHz ($13.08\sim 20.72\text{ GHz}$), -1 dB 带宽为 6.46 GHz ($13.34\sim 19.8\text{ GHz}$)。

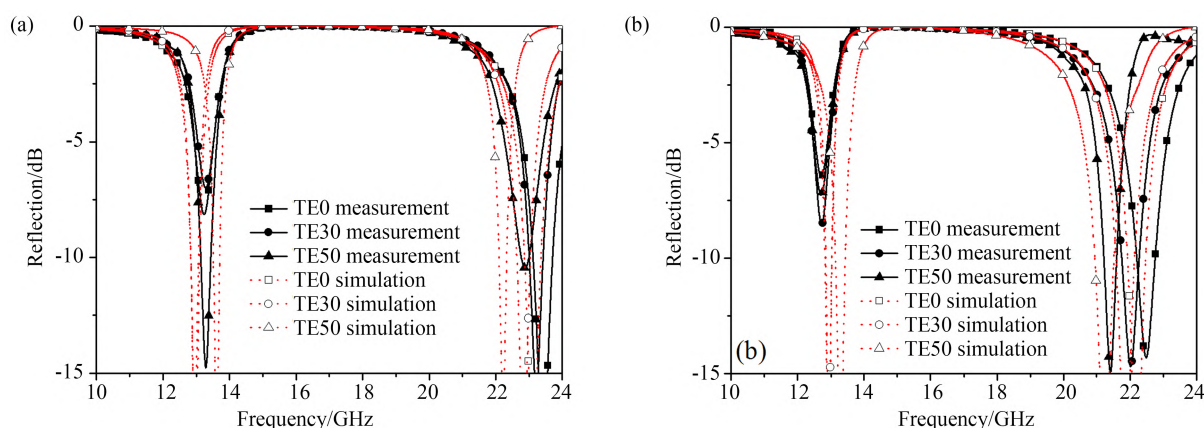


图6 宽带CCFSS电磁传输特性的测试结果与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison between measurement and simulation electromagnetic transmission characteristics of broadband composite coupled FSS

测试结果表明,CCFSS的 -3 dB 带宽最高可达 8.85 GHz ,具有良好的入射角度稳定性,其阻带顶部平坦、边缘陡直性较好。测试结果与仿真结果基本一致。

5 结论

为实现具有稳定传输特性的低剖面、宽带FSS,本文从Y形单元构成的耦合型FSS结构出

发,基于相位、振幅调制理论,提出一种剖面高度仅为0.05 mm的复合耦合型宽带FSS。理论分析和实验测试表明,该宽带FSS的-3 dB仿真带宽为9 GHz,-3 dB测试带宽可达8.85 GHz,入射角度为50°时具有较为稳定的传输特性,其阻带顶部平坦、边缘陡直性好。相较于近年相关研究^[13-14],本文提出的宽带FSS结构在剖面高度方面具有优势,具有薄、轻、柔的特性,更适用于空间受限、大曲率随形贴附的应用环境。

参考文献:

- [1] MA Q, BAI G D, JING H B, *et al.* Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 98.
- [2] 程宏,李洪涛,韩彦军,等. 基于介质超表面的宽谱、大偏转角近红外光束偏转器[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1873-1880.
CHENG H, LI H T, HAN Y J, *et al.* Near-infrared beam deflector with broadband and large deflection angle based on dielectric metasurface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1873-1880. (in Chinese)
- [3] 王进东,叶文成,张伟婷,等. 超构表面红外分光阵列设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(4): 674-681.
WANG J D, YE W CH, ZHANG W T, *et al.* Design of infrared metasurface splitter arrays [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(4): 674-681. (in Chinese)
- [4] MUNK B A. *Frequency Selective Surfaces* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [5] 徐阳,高劲松,徐念喜,等. 低频带通与带阻自由切换的频率选择表面[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 142-149.
XU Y, GAO J S, XU N X, *et al.* A frequency-selective surface structure arbitrarily switched between band-pass and band-stop responses at low frequency [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 142-149. (in Chinese)
- [6] LUO Y B, ZENG Q S, YAN X, *et al.* A graphene-based tunable miniaturized-element frequency selective surface in terahertz band and its application in high-isolation multiple-input multiple-output system [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(12): 2789-2794.
- [7] DENG T W, YU Y F, SHEN Z X, *et al.* Design of 3-D multilayer ferrite-loaded frequency-selective absorbers with wide absorption bands [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(1): 108-117.
- [8] SHARMA A, PANWAR R, KHANNA R. Experimental validation of a frequency-selective surface-loaded hybrid metamaterial absorber with wide bandwidth [J]. *IEEE Magnetics Letters*, 2019, 10: 1-5.
- [9] HUANG F, BATCHELOR J C, PARKER E A. Interwoven convoluted element frequency selective surfaces with wide bandwidths [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(14): 788.
- [10] BARBAGALLO S, MONORCHIO A, MANARA G. Small periodicity FSS screens with enhanced bandwidth performance [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(7): 382.
- [11] 王秀芝. 小型化频率选择表面研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
WANG X ZH. *Study on the Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [12] 杨仕林. 基于电磁耦合结构的频率选表面研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
YANG SH L. *The Study of Frequency Selective Surface Base on EM Coupling* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] ABDOLLAHVAND M, FOROORAGHI K, ENCINAR J A, *et al.* Design and demonstration of a tri-band frequency selective surface for space applications in X, K, and Ka bands [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62

(4): 1742-1751.

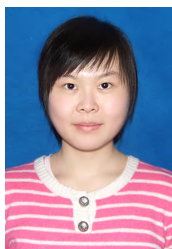
- [14] 章一雄. 新型宽带和多频带三维频率选择表面研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.

ZHANG Y X. *Research on 3D Frequency Selective Surface with Wide Band and Multiple Bands* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)

- [15] 焦健, 徐念喜, 冯晓国, 等. 基于互补屏的主动频率选择表面设计研究[J]. 物理学报, 2013, 62(16): 167306.

JIAO J, XU N X, FENG X G, *et al.* Design and study of the active frequency selective surface based on the complementary screen[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(16): 167306. (in Chinese)

作者简介:



焦 健(1987—),女,黑龙江齐齐哈尔人,讲师,2015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及功能性薄膜材料的研究。E-mail: xinhe7hl@126.com

通讯作者:



高劲松(1968—),男,吉林白城人,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,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