

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220616002

电磁偏谐振阻抗匹配宽带传输超表面设计*

张 潇¹, 吕奇皓², 金 城², 田步宁², 杨 凯²

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100190; 2. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘要:针对传统传输超表面固有高 Q 值导致的工作频带窄的问题, 提出了一种电、磁双模偏谐振阻抗匹配实现宽带传输超表面设计方法。建立了实现低损耗透波阻抗匹配的本征参数模型, 并根据经典 Drude-Lorentz 模型分析了本征参数在电磁谐振与偏谐振区域的电磁特性。基于此, 通过独立激励电、磁偏谐振模式, 设计了满足宽频带阻抗匹配的本征参数电路模型。基于该模型, 通过在超表面中引入金属微带线和平行贴片分别作为电、磁偏谐振器, 调控结构的本征参数, 从而在宽频带内实现所需本征参数条件。仿真和测试结果均证明, 设计的超表面实现了双极化模式相对带宽为 79.5% 的 3 dB 传输带宽, 且结构具有 0°~40° 的斜入射稳定性。该超表面具有超宽带、结构简单的特点, 可应用于高性能天线罩设计中。

关键词:传输超表面; 偏谐振; 本征参数; 阻抗匹配

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号: TN011 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2024)01-0001-07

Broadband Transmission Metasurface Design Based on the Method of Offset-resonance for Impedance Matching

ZHANG Xiao¹, LYU Qihao², JIN Cheng², TIAN Buning², YANG Kai²

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100190, China;

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Traditional transmissive metasurfaces usually have narrow bandwidths due to their inherently large quality factor (Q-value). In this paper, a technique of electric and magnetic dual-mode offset-resonance is proposed to broaden the operating band of transmissive metasurface. The constitutive parameters are firstly modeled to achieve low-loss and broadband transmission. Then, the electromagnetic properties of the constitutive parameters in the resonant and offset-resonant regions are analyzed. Based on these properties, a circuit model satisfying the required condition over a broad band is designed by independently exciting the electric and magnetic offset-resonance. Finally, based on such a circuit model, metallic microstrip and parallel-patches are introduced into the transmissive metasurface as electric and magnetic offset-resonators respectively, thereby manipulating the structural constitutive parameters to achieve the desired values in a broad band. Both the simulated and measured results demonstrate that the designed metasurface exhibits a 3 dB transmission band with a fractional bandwidth of 79.5% for dual-polarization. In addition, the realized broadband performance is with stable angular response from 0° to 40°. The designed transmissive metasurface with broadband transmission and simple structure can potentially be applied in the design of high-performance radome.

Key words: transmissive metasurface; offset-resonance; constitutive parameters; impedance matching

* 收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-07-30
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871036)
通信作者: 吕奇皓 Emai: qihao_lv8080@sina.com

0 引言

超表面是一类由亚波长尺度的“人工原子”按照周期或准周期方式排列组成的电磁结构,其特异性电磁响应可以由等效相对介电常数 ε 和等效磁导率 μ 来表征^[1]。超表面通过在介质材料中引入具有电响应或磁响应的金属结构,从而实现了对结构等效相对介电常数和等效磁导率的调控,即可在所需频带内实现奇异的电磁性能,如负折射现象^[2]、电磁隐身^[3]、光学成像^[4]、逆多普勒效应^[5]等。

近年来,具有传输特性的超表面作为微波系统的天线罩被广泛应用于军事装备、5G 通信等领域。在实际应用系统中,高传输速率和大空间容量要求超表面具有相对较宽的频谱范围。传统的超表面为降低电磁波传输过程中的电磁损耗,通常由具有高 Q 值特性的谐振器组成,从而导致了电磁传输频带较窄^[6],不利于实际应用。

当前,研究人员为了实现超表面的宽频带传输性能,通常在结构中级联多谐振模式,并使这些谐振模式的谐振频率相互靠近,从而将多个窄频带聚合成一个宽频带^[7-8]。2015 年, Li 等人^[9]通过使用多层结构,将多个谐振模式级联实现了宽频带传输超表面设计。2020 年, Wong 等人^[10]在将超表面与 1/4 模介质集成波导(Substrate Integrate Waveguide, SIW)组合,在超表面谐振模式之外引入了 SIW 谐振模式,实现了基于多个谐振模式的宽频带传输性能设计。然而,这些超表面均是基于谐振结构设计,而谐振模式固有的高 Q 值特性导致对带宽提升有限,并且多个谐振模式之间的相互耦合会恶化传输性能,并且增加结构设计复杂度。

本文提出一种采用电、磁双模偏谐振独立激励实现超表面超宽频带传输性能设计的方法。首先基于波阻抗匹配模型,推导了在宽频带内实现低损耗传输性能的超表面本征参数条件。根据经典 Drude-Lorentz 模型,通过激励电、磁双模偏谐振,建立了在宽频带内满足该条件的电路模型,并将该模型应用于超表面结构设计中,通过引入电谐振器金属微带线和磁谐振器金属平行贴片调整结构本征参数,实现了相对带宽为 79.5% 的低损耗传输性能。仿真和测试结果一致,证明了该方法的有效性。

1 理论分析

电磁波入射超表面时,入射电场和磁场与谐振单元相互作用分别激励电、磁响应,从而实现对本征参数 ε 和 μ 的调控。根据边界条件,超表面与空气的波阻抗匹配时实现完美传输性能^[11]。电磁波垂直入射时,超表面 TE 和 TM 极化波阻抗表达式为

$$Z_m^{\text{TE}} = Z_m^{\text{TM}} = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (1)$$

式中: $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \approx 377 \Omega$ 代表自由空间波阻抗。根据波阻抗匹配理论,超表面反射系数可计算为

$$R^{\text{TE/TM}} = \frac{Z_m^{\text{TE/TM}} - \eta_0}{Z_m^{\text{TE/TM}} + \eta_0} = \frac{\sqrt{\mu} - \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\mu} + \sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

电磁波完全透过时,超表面反射系数 $R^{\text{TE/TM}} = 0$,因此得到波阻抗匹配时的本征参数条件,即

$$\varepsilon = \mu \quad (3)$$

根据经典 Drude-Lorentz 模型,电、磁谐振激励时,结构等效相对介电常数和磁导率数值会改变^[12]。当电谐振器被加载到介质上时,激励的电响应对结构等效相对介电常数影响可表达为

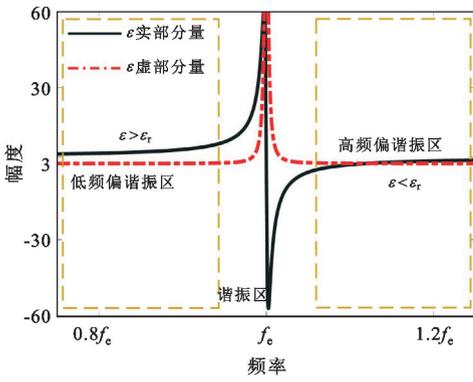
$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_r \left(1 - \frac{F_e f_e^2}{f^2 - f_e^2 + i\gamma_e f} \right) \quad (4)$$

磁响应激励时,相对磁导率变化表达式如下:

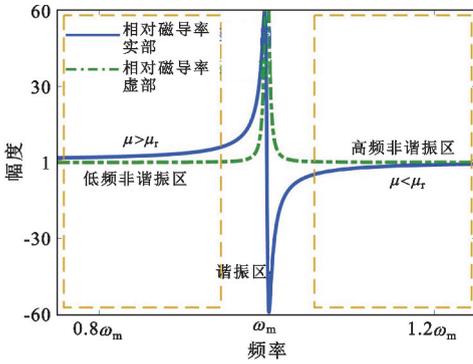
$$\mu_{\text{eff}} = \mu_r \left(1 - \frac{F_m f_m^2}{f^2 - f_m^2 + i\gamma_m f} \right) \quad (5)$$

式(4)和(5)中: ε_r 和 μ_r 为介质相对介电常数和磁导率; F_e 和 F_m 分别代表电、磁响应强度因子; f_e 和 f_m 分别是电、磁谐振频率; γ_e 和 γ_m 分别为电、磁损耗因子,与频率 f 具有相同量级。

为了展示电、磁谐振激励时,相对介电常数和磁导率随频率变化曲线,这里设定电(磁)响应强度因子为 5,损耗因子为 $5 \times 10^7 \text{ Hz}$,介质选择 Rogers RO3003 基板,其相对介电常数为 $\varepsilon_r = 3$,相对磁导率 $\mu_r = 1$ 。图 1 为结构等效相对介电常数和磁导率随频率的变化曲线,可以看出,在谐振频率附近区域内,结构本征参数的实部和虚部分量均具有较大动态范围;在两侧低频和低频偏谐振区域内,实部分量变化平缓,数值接近介质本征参数,虚部分量数值几乎为 0,可忽略不计。



(a) 电谐振的相对介电常数曲线



(b) 磁谐振时的相对磁导率曲线

图 1 超表面的本征参数随频率变化曲线

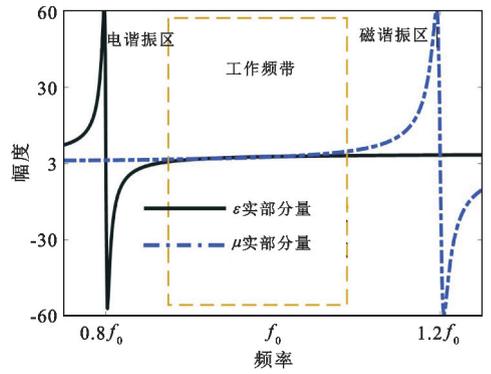
Fig. 1 Eigenparameters of metasurface with frequency

传统超表面通过激励电、磁谐振模式, 控制结构本征参数达到式(3)条件从而实现传输。在电、磁谐振频率附近, 本征参数的快速变化导致所需传输性能仅在单一频点处实现, 因此结构传输带宽较窄。为克服基于谐振结构的超表面带宽窄问题, 采用电、磁双模偏谐振独立激励实现宽带传输性能设计方法。基于这种方法, 式(3)可以在宽频带内实现, 且相对介电常数和磁导率的虚部被抑制以降低损耗。对图 1 研究发现, 非谐振区域有以下三个特性:

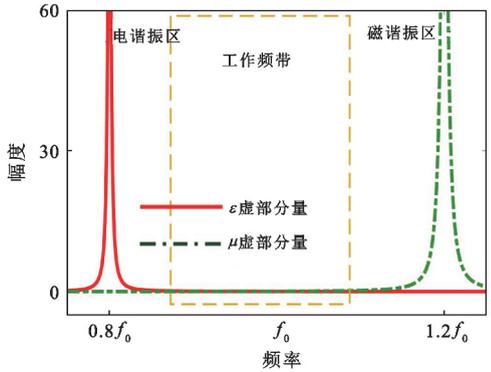
- 1) 在低频偏谐振区域, 结构本征参数数值均高于介质本征参数, 在高频偏谐振区域刚好相反;
- 2) 材料本征参数变化趋势较为平缓;
- 3) 材料本征参数的虚分量接近于零, 对于材料损耗影响可以忽略不计。

电、磁双模偏谐振独立激励方法的设计概念在图 2 中给出, 即在所需工作频带的低频和低频侧分别独立激励电、磁偏谐振模式, 通过进一步调整它们的频率特性, 从而在此频带内实现传输条件 $\epsilon = \mu$ 。结合偏谐振区域的第二个特性可知, 结构的本征参数在此区域内平缓变化趋势使 $\epsilon = \mu$ 得以在相对较宽的频带内实现, 从而实现了宽频带电磁传输性能。另外, 偏谐

振区域的本征参数虚分量可忽略不计的特性降低了结构的传输损耗, 实现了高效传输性能。



(a) 本征参数实部分量



(b) 本征参数虚部分量

图 2 基于电、磁双模偏谐振独立激励方法的超表面本征参数频率变化曲线

Fig. 2 Eigenparameters of metasurface with frequency variation based on electrical and magnetic dual-mode bias resonance independent excitation method

为了验证基于电、磁双模偏谐振激励方法的传输频带展宽性能, 将图 2 中的本征参数值代入式(2)中, 由此获得了图 3 所示的模型传输系数频谱图。可以看出, 基于该方法实现超表面在所需工作频带内具有宽带传输性能, 且传输损耗非常低。

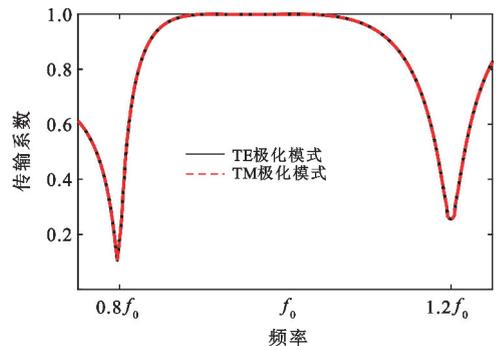


图 3 基于电、磁双模偏谐振独立激励的超表面传输系数

Fig. 3 Transmission coefficient of metasurface based on electrical and magnetic dual-mode bias resonance independent excitation

2 超表面单元及工作机理

传输超表面单元结构如图 4(a) 所示,由介质和金属单元沿 x 和 y 轴方向,以周期长度 P_x 和 P_y 排布而成。介质选用 Rogers RO3003 材料 ($\epsilon_r = 3$, $\mu_r = 1$),金属微带线和平行贴片分别作为电、磁谐振器加载在介质中。如图 4(b) 所示,两个相互正交的金属微带线作为电谐振器被放置于介质中心层;相互平行的边长为 l 的正方形金属贴片被放置于介质顶层和底层构成磁谐振器,如图 4(c) 所示。

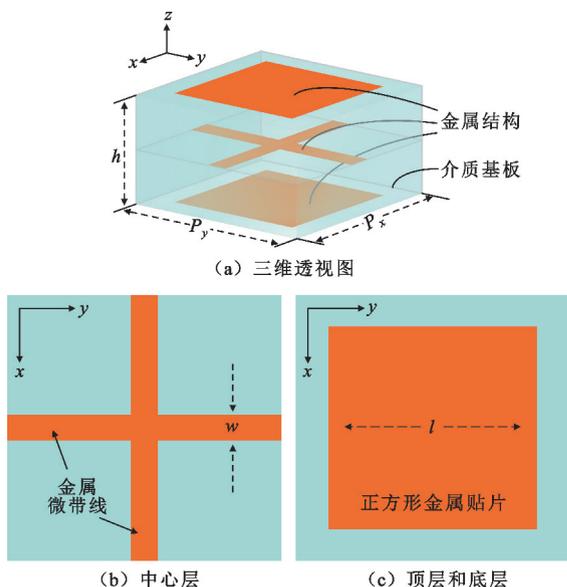


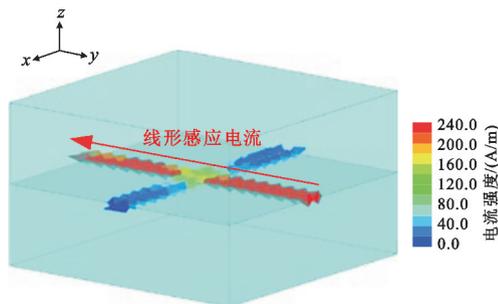
图 4 宽频带传输超表面结构

Fig. 4 Structure diagram of broadband transmission metasurface

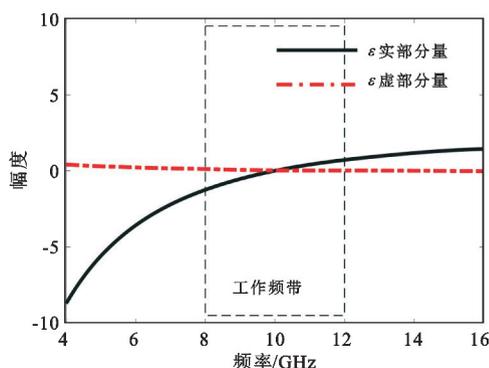
为了分析超表面的宽频带传输机理,需要对金属微带线和平行金属贴片的电、磁偏谐振机理分别进行分析。该超表面的中心对称结构在 TE 和 TM 极化模式下电磁波垂直入射时的电磁性能一致,因此为了简化分析过程,这里主要针对 TE 极化电磁波垂直入射的情况进行详细地分析。

图 5(a) 为金属微带线结构在工作频带内的表面电流分布图。位于 xoz 平面的 TE 极化电磁波入射时,沿 y 轴的电场驱动微带线内自由电子沿该方向做定向运动而打破结构电中性。此时,金属微带线可看成电偶极子,从而激励了电谐振模式产生。图 5(b) 和 (c) 为根据 S 参数反演法获得的结构本征参数 ϵ 和 μ 变化曲线图,可以看出,结构的相对介电常数实部分量随着频率的增加从一个非常小的负值逐渐增加到接近于介质的相对介电常数。与介质基板相比,结构相对介电常数的实部分量被显著降低,虚部分量几乎为零,并且在工作频带内变化率相对

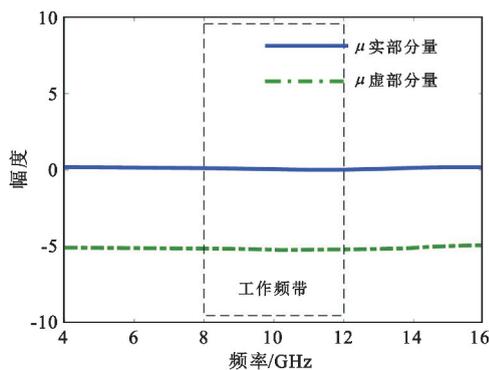
较为平缓。此外,结构相对磁导率的数值基本保持不变,这意味着金属微带线的加载可以对结构相对介电常数进行独立调控,而不影响相对磁导率。



(a) 表面电流分布



(b) 相对介电常数频率响应



(c) 相对磁导率频率响应

图 5 电谐振结构电磁性能

Fig. 5 Electromagnetic performance diagram of electrical resonance structure

接下来,为了实现传输条件 $\epsilon = \mu$,在介质中引入平行金属贴片作为磁谐振器来调整结构相对磁导率。图 6(a) 给出了加载金属贴片的表面电流分布图。如图所示,当电场沿 y 轴入射时,顶层金属贴片的表面电流沿该方向流动,底层金属贴片的表面电流沿 $-y$ 轴方向流动。此时,两层金属贴片表面激励的电流在 $yo z$ 平面上呈环形流动,故该结构可以等效为磁谐振器,从而激励磁谐振模式的产生。

图 6(b) 和 (c) 为结构本征参数 ϵ 和 μ 随频率变化曲线图, 可以看出, 结构相对磁导率实部和虚部分量均从低频处逐渐增加, 在 12.5 GHz 处达到最大值后开始衰减。在工作频带内, 相对磁导率实部分量以相对平稳的趋势逐渐增加且数值高于介质的相对磁导率, 虚部分量则几乎保持为零。值得注意的是, 磁谐振通常伴生着抗电谐振效应, 会影响结构相对介电常数。随着频率的增加, 结构相对介电常数实部分量逐渐降低, 虚部分量保持为零; 当频率达到磁谐振频率时, 实部分量数值达到最小值后开始增加, 而虚部分量则开始降低。由于工作频带位于磁谐振的低频偏谐振区域, 因此相对介电常数在此区域内仍能保持平稳变化趋势。

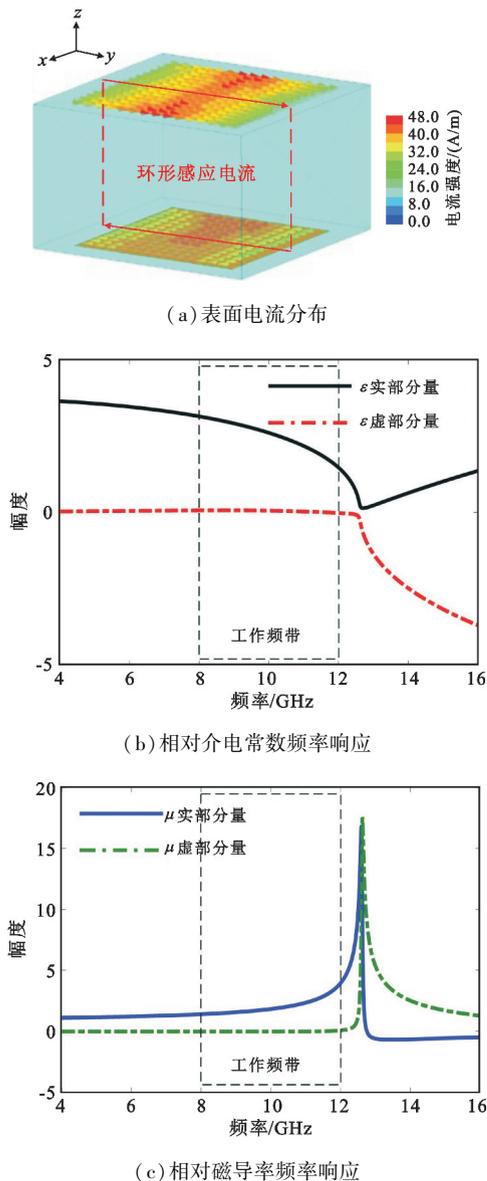


图 6 磁谐振结构电磁性能

Fig. 6 Electromagnetic performance diagram of magnetic resonance structure

3 设计实例及仿真结果

为了实现中心频率为 10 GHz、相对带宽为 80% 的低损耗传输超表面设计, 将上文介绍的相互独立的电、磁谐振结构进行组合, 实现图 4(a) 所示的宽频带传输超表面结构设计。经过对结构传输性能的优化, 得到该超表面的尺寸设计如下: $P_x = P_y = 5 \text{ mm}$, $h = 1.5 \text{ mm}$, $l = 3.8 \text{ mm}$, $w = 0.4 \text{ mm}$ 。

仿真结果如图 7 所示, 结构相对介电常数和相对磁导率在宽频带内具有相近的数值, 符合宽频带电磁传输条件。此外, 结构本征参数在工作频带内的虚部分量数值几乎为零, 降低了结构传输损耗。

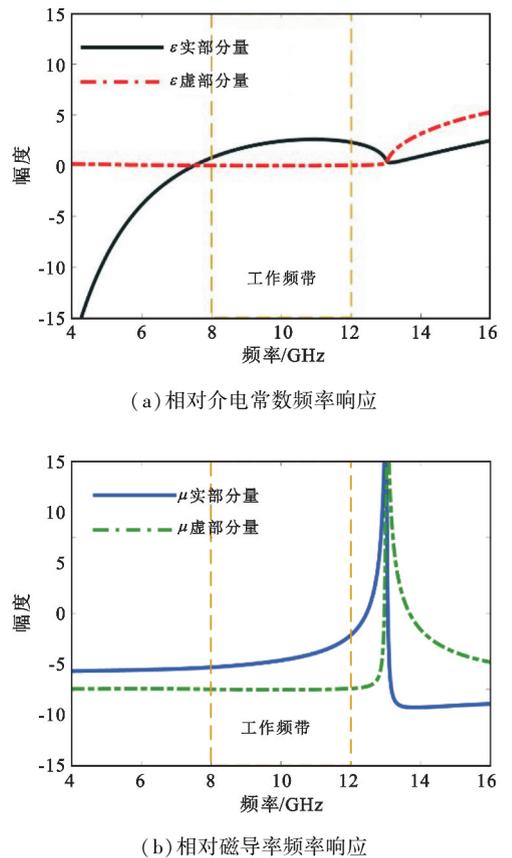
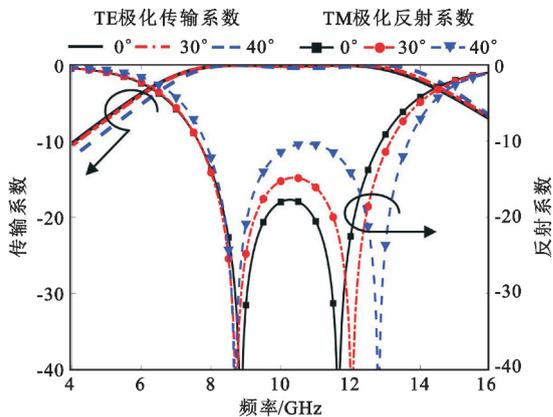


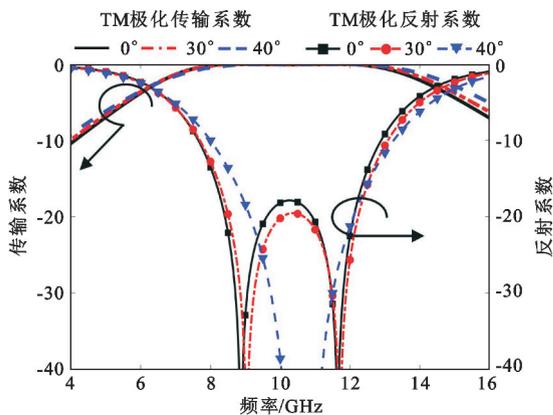
图 7 宽频带传输超表面本征参数频率响应

Fig. 7 Eigenparameters of broadband transmission metasurface with frequency response

图 8 给出了结构在 TE 和 TM 极化下的传输系数, 可以看出该结构 3 dB 传输带宽为 6.2~14.45 GHz, 传输通带内的最小插入损耗为 0.2 dB。此外, 在实际应用中, 超表面在不同斜入射角度下的传输性能稳定性也是重要指标之一。如图所示, 该结构可以实现 $0^\circ \sim 40^\circ$ 入射角域内实现稳定的双极化传输性能。



(a) TE 极化



(a) TM 极化

图 8 宽带传输超表面传输与反射系数仿真结果
Fig. 8 Simulation diagram of transmission and reflection coefficient of broadband transmission metasurface

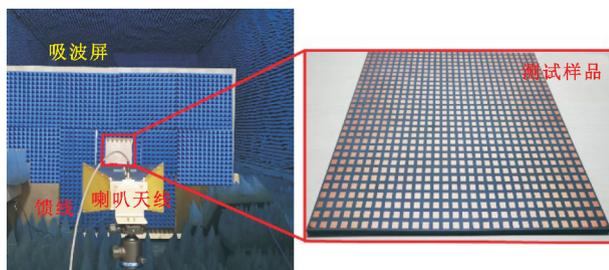
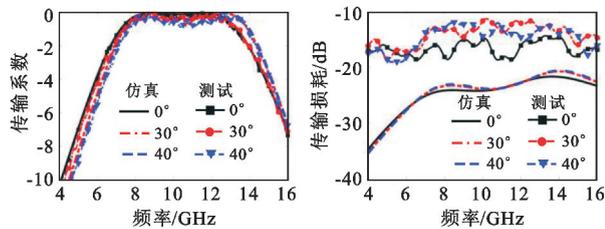
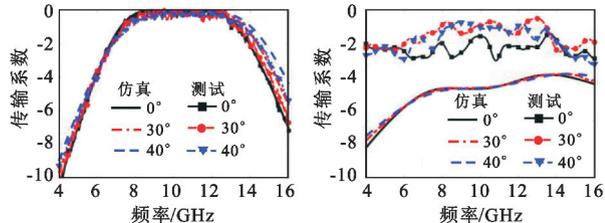


图 9 宽带传输超表面加工样品
Fig. 9 Processing sample diagram of broadband transmission metasurface



(a) TE 极化



(b) TM 极化

图 10 宽带传输超表面测试传输系数与传输损耗
Fig. 10 Transmission coefficient and transmission loss of broadband transmission metasurface

4 实验及测试

为了验证设计超表面的电磁传输性能,使用 PCB 技术将三层金属结构分别刻蚀在两层介质基板上,并通过层压技术将两层介质基板进行压合,从而得到超表面的加工样品,如图 9 所示。加工的样品由 30×30 个周期单元组成,整体尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。为了消除空间电磁环境中的电磁干扰,在微波暗室中采用自由空间法对样品的电磁性能进行测试^[13]。图 10 给出了宽带超表面的测试与仿真传输系数与传输损耗对比结果,传输系数与图 8 所示的仿真结果基本一致,证明了设计的超表面的 3 dB 传输频带在 $6.25 \sim 14.38 \text{ GHz}$ 超宽带内实现,相对带宽为 79.5%,且在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 斜入射角域内具有稳定的传输性能。传输损耗的仿真与测试结果之间的差异是由于测试装置与馈线存在损耗导致的。从图中可以看出,传输损耗测试结果低于 -10 dB ,对结构传输系数的测试结果影响较小。

为了展示本文设计超表面的超宽带传输效果,表 1 列举了与其他同类型传输超表面的性能对比,表中 λ_L 为最小传输频点对应波长。从表中可以看出,所设计的超表面可以在更宽的相对带宽 (79.5%) 内实现高效电磁传输性能 ($|S_{21}| > -3 \text{ dB}$),且在传输频段内的插入损耗约为 0.2 dB 。另外,相比于其他结构,设计的超表面的厚度相对较薄,稳定传输的角度响应最高可以达到 40° 。

表 1 与同类型传输超表面的性能比较
Tab. 1 Performance comparison with the same type of transmission metasurface

超表面	中心频点/GHz	相对带宽/%	插入损耗/dB	结构厚度/ λ_L	角度响应/ $(^\circ)$
文献[7]		18.0	1.00	0.47	45
文献[9]	10.85	25.0	1.00	0.25	45
文献[10]	9.70	49.0	0.05	0.05	60
本文	10.32	79.5	0.20	0.05	40

5 结 论

本文提出了采用电、磁双模偏谐振独立激励方法,实现了超表面的超宽频带电磁传输性能。首先通过公式推导获得了超表面低损耗传输的本征参数条件,并通过激励电、磁偏谐振模式设计了宽频带内实现该条件的结构模型。基于此模型,设计了一种由金属微带线和金属平行贴片组成的传输超表面,仿真和测试结果均证明该结构在相对带宽为 79.5% 的频带内具有的低损耗传输性能。

参考文献:

- [1] 夏雨,王毅,曹群生.一种基于机械旋转的可重构超表面电磁开关设计[J].微波学报,2021,37(5):68-72.
- [2] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. Science, 2004, 305 (5685) : 788-792.
- [3] WU M, ZHAO X, ZHANG J, et al. A three-dimensional all-metal terahertz metamaterial perfect absorber [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111 (5) : 1-5.
- [4] KUNDITZ N, SMITH D R. Extreme-angle broadband metamaterial lens [J]. Nature Materials, 2010, 9 (2) : 129-132.
- [5] ESTAKHRI N M, NEDER V, KNIGHT M W, et al. Visible light, wide-angle graded metasurface for back reflection [J]. ACS Photonics, 2017, 4 (2) : 228-235.
- [6] 李育青,裴志斌,屈绍波,等.具有宽频特性带通频率选择表面的设计[J].电讯技术,2012,52(3):371-374.
- [7] 王义富.基于滤波器电路设计多层带通频率选择表面[J].电波科学学报,2019,34(2):145-151.
- [8] 赵崧,刘进,刘杰,等.复杂电磁频谱环境中 YIG 调谐带阻滤波器干扰抑制技术[J].磁性材料及器件,2019,50(4):17-21.
- [9] LI Y, LI L, ZHANG Y, et al. Design and synthesis of multilayer frequency selective surface based on antenna-

filter-antenna using Minkowski fractal structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63 (1) : 133-141.

- [10] WANG H B, CHENG Y J, CHEN Z N. Wideband and wide-angle FSS using loop slotted hybrid quarter-mode substrate integrated cavity with two independently controllable poles [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68 (12) : 8221-8226.
- [11] POZAR D M. Microwave engineering [M]. New York : Wiley, 2005.
- [12] SIMOVSKI C R, BELOY P A, HE S. Backward wave region and negative material parameters of a structure formed by lattices of wires and split-ring resonators [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51 (10) : 2582-2591.
- [13] LV Q, JIN C, ZHANG B, et al. Hybrid absorptive-diffusive frequency selective radome [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69 (6) : 3312-3321.

作者简介:

张 潇 男,1981 年生于河北固安,2006 年获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为超构表面、航天器系统设计。

吕奇皓 男,1994 年生于河北石家庄,博士研究生,主要研究方向为超构电磁表面、毫米波天线。

金 城 男,1984 年生于河北廊坊,2012 年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为多模态超构电磁表面、微波/毫米波天线。

田步宁 男,1970 年生于陕西扶风,1999 年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为智能天线,微波测量。

杨 凯 男,1983 年生于河南济源,2011 年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为信息与网络、网络安全。