

工作频率可重构的多层超表面设计^{*}

王哲飞 张晋滔 陈鹏飞 王佳锋 周加烨

(南京信息工程大学 南京 210044)

摘要: 为应对现代通信系统日益复杂的通信环境需求以及充分利用有限的频谱资源,提出了一种采用超表面结构与有源器件 PIN 二极管和变容二极管结合的设计,以实现双极化功能频率独立可重构的多模式特性。与传统多模式结构不同,该设计利用 PIN 二极管独立调控双极化波的透射和反射状态,并利用变容二极管实现对双极化波透射窗口的动态调频,可实现 9 种工作模式的切换。本设计在静态状态下,能够独立调控 TE 和 TM 极化波的透射和反射;在切换到动态状态时,除了调控极化波外,还增加了独立调谐 TE 或 TM 极化波透射窗口偏移的功能。各个模式之间相互独立,模式兼容性良好。此外,在 0°~45°入射角度范围,本设计表现出良好的角度稳定性。通过使用电磁仿真软件 CST 进行实验验证,证明了本设计的可靠性,显示其在天线罩和信号多频传输方面具有广泛的应用前景。

关键词: 超表面;多模式;可重构;可调频;天线罩

中图分类号: TN820 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Multi-layer meta-surface design with reconfigurable operating frequency

Wang Zhefei Zhang Jintao Chen Pengfei Wang Jiafeng Zhou Jiaye

(Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To cope with the increasingly complex communication environment requirements of modern communication systems and fully use limited spectrum resources, this paper proposes a design that uses a meta-surface structure combined with active devices PIN diodes and varactor diodes to achieve dual polarization functional frequency independence—reconfigurable multi-modal features. Different from the traditional multi-mode structure, this design uses PIN diodes to control the transmission and reflection states of dual-polarized waves independently and uses varactor diodes to achieve dynamic frequency modulation of the dual-polarized wave transmission window, enabling switching of 9 working modes. In the static state, this design can independently control the transmission and reflection of TE and TM polarized waves; switching to the dynamic state and regulating the polarized waves adds an independent tuning TE or TM polarized wave transmission window offset. function. Each mode is independent of each other and has good mode compatibility. In addition, this design shows good angular stability in the incident angle range of 0°~45°. Experimental verification using the electromagnetic simulation software CST proves the reliability of this design and shows that it has broad application prospects in radomes and signal multi-frequency transmission.

Keywords: meta-surface; multi-function; reconfigurable; tunable frequency; radomes

0 引言

频率选择表面(frequency selective-surface, FSS)又被称为人工电磁超表面结构,是一种人工设计的周期性结构^[1]。在过去的 10 年里,引起了众多学者的研究。电磁超表面结构以其卓越的空间滤波功能,在滤波器^[2-3]、吸波体^[4-5]和天线设计^[6-7]等领域得到了广泛应用。然而,传统

无源 FSS 结构一旦形成,其传输频点和工作模型都是固定的,难以适应电磁环境的多变情况。为了应对复杂的通信环境并充分利用有限的频段资源,本文在无源 FSS 结构的基础上推进了有源 FSS 结构的发展。有源频率选择表面(active frequency selective-surface, AFSS)集成了有源器件,能够对电磁波进行可重构和可调频的操作。相较于传统结构,AFSS 结构不仅增加了设计的自由度,而且拓展了

工作频带的范围^[8-9]。因此,从实际应用的角度出发,具备多功能、可重构、可调谐特性的 AFSS 结构展现出更为广泛的应用前景。

目前,大多数的 AFSS 都是通过加载 PIN 二极管^[10]、变容二极管^[11]等技术来实现有源 AFSS 结构工作状态、工作模式、极化类型的可重构功能。Bakshi 等^[12]于 2019 年基于 LC 并联谐振等效电路原理,采用在底层加载 PIN 二极管的技术,设计了一款可重构传输/吸收一体的 AFSS 结构,实现了在 2.88 GHz 处传输带和 3.8~10.3 GHz 吸收带的可重构。然而,该设计无法独立调控不同的极化波。2019 年,Phon 等^[13]在两层周期结构加载 PIN 二极管,设计了一种具有多工作模式的 AFSS,实现了传输/吸收/反射 3 种模式的可重构切换。尽管该设计能够独立调控,但仅在 2.3 GHz 处的传输带可以切换,存在多频段调谐方面的局限性。2020 年 Li 等^[14]提出利用高阶 FSS 拓展通带的方法设计了一款可切换的 AFSS,该设计能够实现在电磁传输和电磁吸收功能之间的切换特性,在通带内具有高效的隐身性能。但是,该 AFSS 仅用 PIN 二极管完成切换特性导致在多频段调谐方面具有限制。2020 年, Ghosh 等^[15]提出了一种双波段可调谐的带阻 AFSS,该设计对顶层和底层进行独立调控,实现对两个波段阻带的独立调频,扩大了在多波段通信系统和天线罩领域的应用。然而,该设计虽然能够实现多频段调谐,但在工作模式上相对单一固定,不能独立调控不同的极化波。Shah 等^[16]于 2021 年设计了一款 4 bit 的多功能 AFSS 结构,利用 PIN 二极管实现了 7 种不同的功能状态,虽然能够在两个频点处对 TE 和 TM 极化波的独立控制传输\屏蔽状态,但是无法在整个工作频段内进行有效的频率调谐控制。2022 年,同样是 Shah 等^[17]设计了一款多功能的 AFSS,通过 4 种不同的工作状态可以实现双极化波传输、单频点吸收和低频处的反射,但是此 AFSS 结构仅仅针对单频点的工作特性对于多频段调谐方面具有技术局限性。然而,上述提及的 AFSS 具备实现多工作模式的切换、多频段的可调谐和不同极化波独立调控的特性。相较于单一的 AFSS 设计,具有一定的实际应用优势,但它们却并未将这三者结合在一起,在实际复杂的通信环境和多波段电磁环境应用中仍存在一定的局限性。本文提出的设计能够将多功能可重构特性与多频段可调谐特性充分结合,既能实现对不同极化波的独立调控,又能实现对极化波多频段可调谐,还可以实现极化波在传输/屏蔽状态下的切换特性。

本文针对前述 AFSS 可重构/可调谐结构设计存在的不足之处,提出了一种具备双极化独立调控的多频段可调谐有源频率选择表面结构。该结构拥有两种工作状态:静态和动态,共计 9 种工作模式,可实现静态双极化传输、静态双极化屏蔽、静态单极化传输/屏蔽、动态双极化传输带可调谐、动态单极化传输调频/屏蔽等功能。这些模式之间可相互切换,互不影响。在静态双极化传输模式下,多

层 FSS 结构可实现 TE 和 TM 极化波的独立滤波传输。通过采用正交的顶层和底层 FSS 结构馈电设计,可以分别控制 TE 和 TM 极化波的滤波和屏蔽特性。利用两层的 PIN 二极管实现对两种极化波的可重构特性,而变容二极管则可实现对两种极化波的可调谐特性。通过不同的偏置电压和馈电网络操作,实现静态和动态的工作状态及多种工作模式。本设计采用多层金属贴片构造多层可重构 AFSS,多层设计不仅为该结构提供了工作模式和工作频率可重构特性,更为结构提供了在斜入射 45° 范围内的极化稳定性。

为了研究分析的便利,本文建立了在不同极化波入射下的等效电路模型,以更好地分析所设计结构的工作原理。在静态模式的传输工作状态下,TE 和 TM 极化波在工作频段内具有较高的传输效率,最小插入损耗为 0.2 dB。在静态模式屏蔽工作状态下,TE 和 TM 极化波在整个工作频带都无法穿透结构,呈现优异的电磁反射特性。在动态模型传输状态下,TE 和 TM 极化波能够在 4.16~1.54 GHz 范围内进行有效的电磁波调频,传输效率始终高于 80%,保持高效率透射,实现对电磁波的有效传输。最后,通过电路仿真和数值计算方法验证了本设计模型的有效性和可靠性。

1 单元结构与设计方法

为更深入理解本文提出的双极化独立调频可重构特性的 AFSS 结构,图 1 生动展示了该设计的可重构可调频特性。在图 1(a)中呈现了传统 AFSS 结构的可重构特性,通过调整 PIN 二极管电压偏置状态,其功能可在电磁传输与电磁屏蔽之间灵活切换。然而,传统设计无法独立调控不同极化波,在复杂通信环境中应用受到限制。为解决这一技术挑战,本文提出了一款崭新的可重构可调频 AFSS,其工作模式如图 1(b)所示。与图 1(a)中的传统有源结构不同,该设计不仅能在静态下利用 PIN 二极管对 TE 极化波和 TM 极化波进行独立调控,而且具有静态和动态两种工作状态,互不干扰。传统结构因其固定性和局限性仅能同时调控双极化波,控制双极化波的传输或反射,而无法实现独立调控。通过图 1(b)可知,本设计在静态下克服了传统结构的技术限制。更进一步,本设计引入了动态状态,不仅可以独立调控电磁波,还能对电磁波传输进行调频操作,拓展了设计的工作频段。这项设计满足了日益复杂的电磁通信环境需求,有效利用有限的频段资源。

本文提出的双极化独立调频的可重构 AFSS 结构,如图 2 所示,沿着+y(TE) 和 +x(TM) 方向呈周期性排列。该结构由 3 层 PEC 金属 FSS 结构层和两层 Rogers RO3 003 介质层(介电常数为 3)组成。PIN 二极管和变容二极管通过等效电路器件替代进行建模。在结构中,第 1 层的 PIN 二极管和变容二极管分别负责调控 TM 极化波的可重构特性和 TE 极化波的可调频特性;第 3 层的 PIN 二极管和变

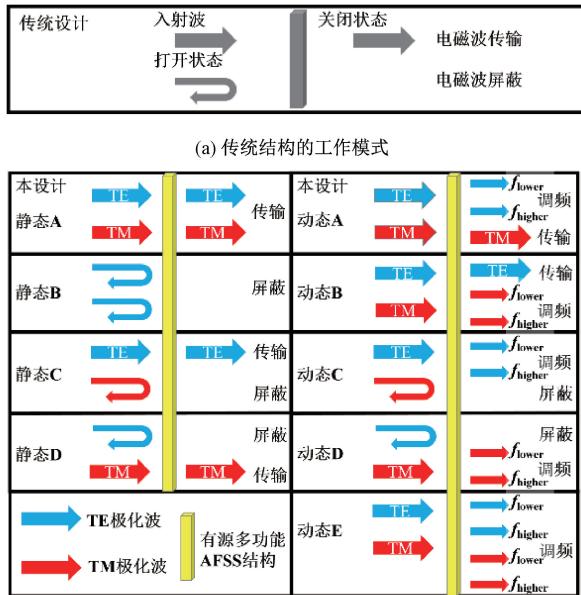


图 1 有源 AFSS 工作模式

容二极管则分别调控 TE 极化波的可重构特性和 TE 极化波的可调频特性。变容二极管变容的工作原理是需要施加不同的电压来实现,本文的馈电网络布置在介质板的另一侧,通过两条金属导电细条引出至结构的边缘,以便施加偏置电压,两个极化方向上的馈电线互不干扰,达到独立频率可重构的目标。通过仿真模拟和数值计算拟合,得出结构以及各层的主要周期尺寸:介质层的厚度 $t_1 = 0.3$ mm, $t_2 = 0.127$ mm, 单元周期尺寸 $P = 8$ mm, $a = 3$ mm, $b = 7$ mm, $c = 1.6$ mm, $d = 6.8$ mm。

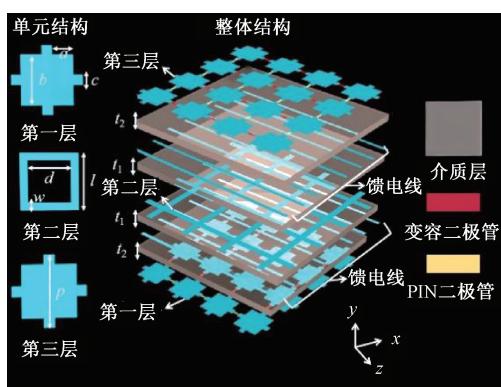


图 2 本设计结构示意图

为了更深入地解析本设计的工作原理,建立了与单元结构相对应的等效电路模型进行详细分析。如图 3 所示,在文中呈现了本设计的等效电路模型图。I 层和 III 层的超材料表面上的 PIN 二极管和变容二极管的排列呈正交关系,分别负责调控不同极化波。因此,本文针对两种不同极化波分别建立了对应的等效电路模型图。 $L_1 \sim L_4$ 为结构等效的电感, C 为结构等效的电容, C_v 为变容二极管等效的可变电容, Z_0 为阻抗, L_{Diode} 为 PIN 二极管等效的电感, C_{Diode} 为 PIN 二极管等效的电容, R_{Diode} 为 PIN 二极管的电阻, R 为变容二极管等效的电阻, L_4 为变容二极管等效的电感。

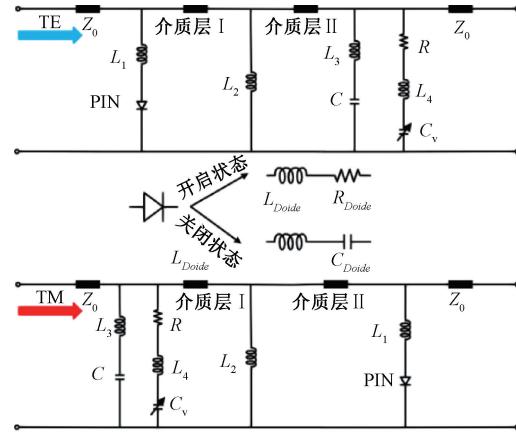


图 3 两种入射波下的结构等效电路模型

电容 C 、电感 L 的数值计算公式为:

$$L = \mu_0 \mu_t \frac{p}{2\pi} \ln \left[\frac{1}{\sin(l\pi/2p)} \right] \quad (1)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_t \frac{2p}{\pi} \ln \left[\frac{1}{\sin(\varpi\pi/2p)} \right] \quad (2)$$

其中, μ_0 是真空磁导率; ϵ_0 是真空介电常数; μ_t 是介质材料磁导率; ϵ_t 是介质材料介电常数; P 是单元结构的周期尺寸; l 是 AFSS 结构的长度; w 是 AFSS 结构之间的宽度。

根据上述公式和商业仿真软件 Advanced Design System (ADS) 2022 进行数值估算、仿真模拟、比对优化之后,最终等效电路中各元器件的数值参数为: $L_1 = 0.27$ nH, $L_2 = 0.83$ nH, $L_3 = 0.57$ nH, $C = 0.67$ nH。本设计采用的 PIN 二极管型号为 NXP 公司提供的 BAP 70-03, 其内置具体参数为 $C_{\text{Diode}} = 100$ pF, $L_{\text{Diode}} = 1.5$ nH, $R_{\text{Diode}} = 1.5$ Ω, PIN 二极管导通状态为 $L_{\text{Diode}} R_{\text{Diode}}$, 截止状态为 $L_{\text{Diode}} C_{\text{Diode}}$ 。根据 SKYWORKS 公司提供的变容二极管 SMV2019-079LF 具体参数, 其内置具体参数为 $R = 4.8$ Ω, $L_4 = 0.7$ nH, $C_v = 0.3 \sim 2.22$ pF, 不同电压会改变变容二极管内置的电容参数值。

2 分析与讨论

基于上述设计方法与思路的讨论,基于商业仿真软件 ADS 分析本设计等效电路仿真结果如图 4 所示。图 4(a)和(b)分别展示了在 TE 极化波和 TM 极化波入射下的两种静态工作状态。从图中可以看出,在截止状态下, PIN 二极管等效电路为 $L_{\text{Diode}} R_{\text{Diode}}$, 不管是 TE 极化波还是 TM 极化波入射,在整个工作频段 1~4.5 GHz 结构呈现全反射工作特性,可以当成电磁信号屏蔽器应用。在切换到导通状态下, PIN 二极管等效电路为 $L_{\text{Diode}} C_{\text{Diode}}$, 层 I 和层 II 之

间产生谐振, 整体结构呈现传输特性, 在 4.1 GHz 处产生一个传输窗口, 结构表现为电磁带通滤波器特性。等效电路模型成功验证了本设计在 TE 和 TM 极化波下的静态独立调控特性, 实现了对 TE 和 TM 极化波传输和屏蔽状态的有效掌控。同时, 该设计在两种极化下表现出较好的性能稳定性。通过对等效电路的验证, 本设计基本具备了极化独立调控的多模式可重构特性。接下来, 本文将针对静动态情况下的 AFSS 结构进行仿真验证, 以全面评估其性能。

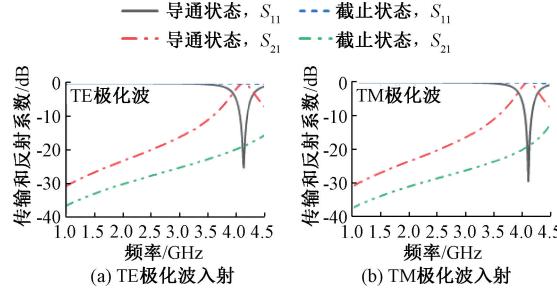


图 4 等效电路模型的性能结果

根据商业仿真软件 CST Microwave Studio, 本文对所提出的结构进行了微波环境的仿真模拟验证, 相关结果如图 5 和 6 所示。从图 5 可以清晰地观察到本设计在静态工作状态下的表现。如图 5(a)所示, 当面对 TE 和 TM 极化波入射时, 本设计可作为带通滤波器, 有效传输电磁信号。图 5(b)所示, 当双极化波入射时, 本设计可作为电磁信号屏蔽器, 在整个工作频段内实现对电磁信号的有效反射屏蔽。图 5(c)和(d)显示, 本设计具备对 TE 和 TM 极化波独立调控的能力, 可自由控制极化方向电磁信号的传输或反射, 从而验证了设计的双极化可重构调控特性。如图 6(a)所示, 在动态 A 模式下, 通过独立调频操作, 本设计可对 TE 极化波进行调频。通过施加 0~20 V 的偏置电压改变变容二极管的特性, 具体等效电路参数如表 1 所示, 实现了 TE 极化波从 4.16~1.59 GHz 的传输通带偏移, 同时 TM 极化波处于静态, 呈现 4.08 GHz 的带通传输滤波特性。图 6(b)中, 在动态 B 模式下, TM 极化波的通带滤波偏移范围为 4.08~1.54 GHz, 而 TE 极化波在 4.16 GHz 处于静态传输模式。图 6(c)和(d)展示了在动态 C 和 D 模式下实现了某一极化波的调频操作, 同时另一极化波进行屏蔽反射, 在整个工作频段内都能有效屏蔽电磁信号。图 6(e)中, 动态 E 模式下, 本设计能够对 TE 和 TM 两种极化波进行有效的传输调频操作。综合而言, 本设计在静态和动态下表现出可重构可调频特性, 具有 9 种工作模式, 从而验证了其有效性和可靠性。值得注意的是, 在应对复杂的电磁通信环境和紧缺的频段资源利用方面, 本设计展现出了较强的竞争力。

为了深入探讨本设计的可靠性和稳定性, 图 7(a)~(d)分别展示了在施加反向 20 V 电压情况下 TE 和 TM 极化

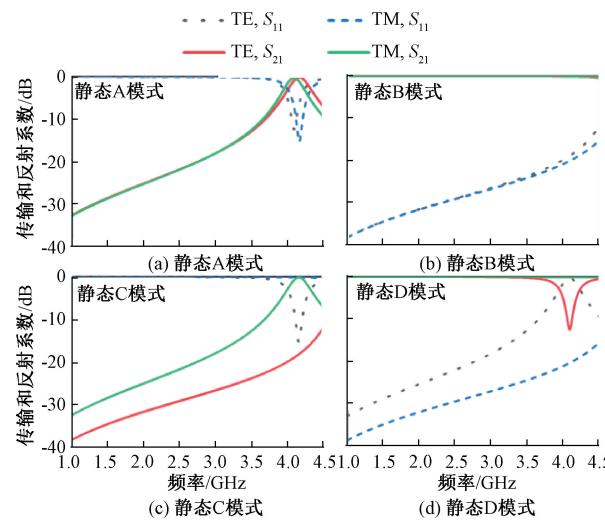


图 5 静态模式下传输\屏蔽特性结果

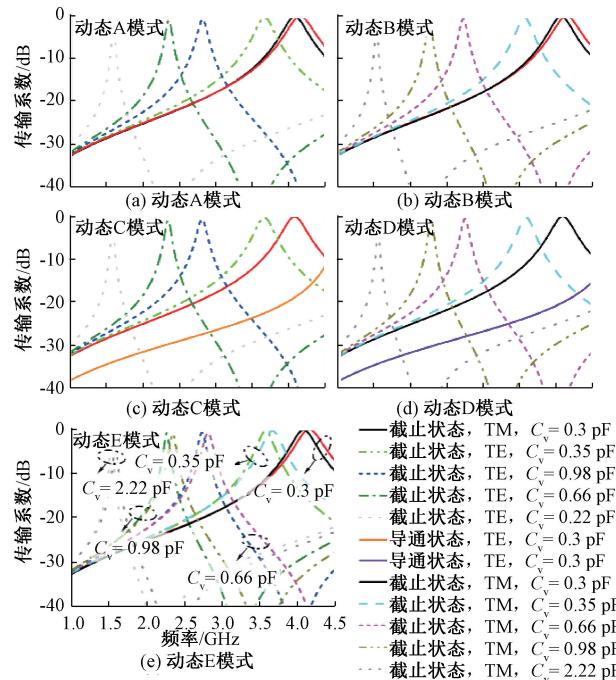


图 6 动态模式下传输\屏蔽特性结果

表 1 变容二极管 SMV2019-079LF 随电压变化的等效电路参数值

电压 DC/V	C_v /pF	R /Ω	L_4 /nH
0	2.22	4.8	0.7
-3	0.98	4.8	0.7
-5	0.66	4.8	0.7
-12	0.35	4.8	0.7
-20	0.3	4.8	0.7

波在截止状态和导通状态, 本设计在斜入射条件下的传输性能结果。从图中可观察到, 在 0° ~ 45° 的入射角范围内,

不论是 TE 还是 TM 极化波,该设计在传输模式下均能保持高效率的信号通信传输功能。与此相比,在屏蔽模式下的性能几乎不受入射角度增大的影响,呈现出稳定的斜入射性能。

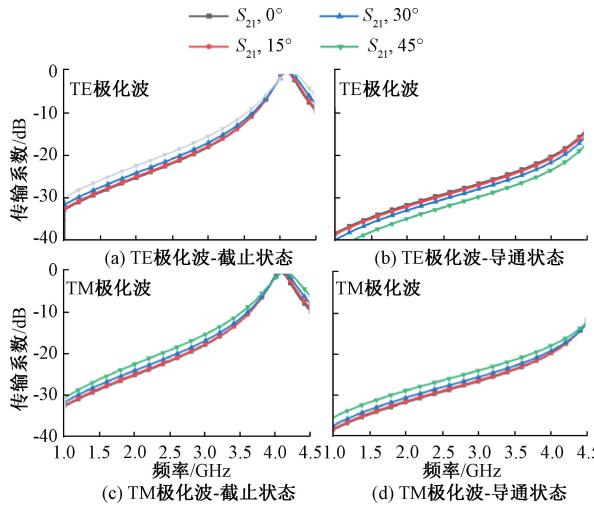


图 7 斜入射下的传输特性

为了进一步验证所提出的传输模式和屏蔽模式设计的性能,图 8 展示了结构表面入射波的电场分布特性。在静态 A 模式下,不论是 TE 还是 TM 极化波,当电磁波以 2.16 GHz 和 4.5 GHz 入射时,均未能有效穿透结构,而被反射回去。唯有在 4.16 GHz 时,电磁波穿透结构,表现出稳定的电磁传输特性。在静态 B 模式下,TE 和 TM 极化波在整个工作频段都未能穿透结构,呈现出稳定的电磁屏蔽特性。在静态 C 和 D 模式下,清晰可见对 TE 和 TM 极化波的独立调控,C 模式下 TE 波能够穿透结构,而在 D 模式下,TM 波则能够穿透。动态模式下的工作原理与静态模式相似,结构能够在不同频率下实现传输特性,拓展了设

计应用的范围。图 8 中的电场分布图直观验证了本设计的正确性,同时展示了在不同模式状态下的工作特性。

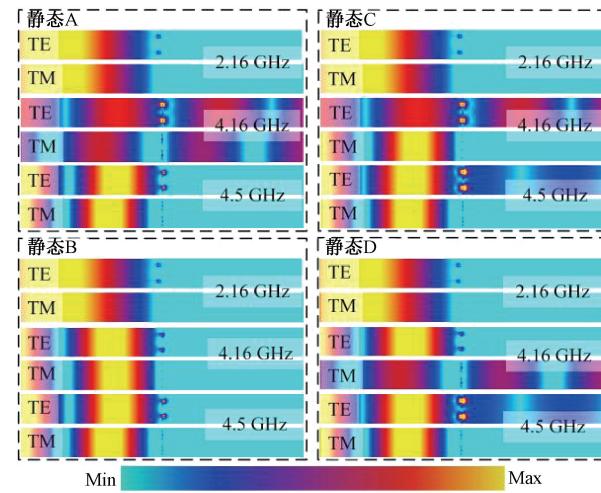


图 8 入射波平面的电场分布图

为了更全面地展示本设计的优势,表 2 对比了近年来有源 AFSS 设计的性能。在工作频段、工作模式数量、可调谐类型、极化独立调控、调频范围、斜入射角度稳定性以及最小插入损耗等多个方面进行了详细比较。本设计在工作频段内,共有 9 种工作模式,既能实现功能可调谐,又能实现频率可调谐,在传输调频模式下,实现了 1.54~4.16 GHz 的传输通带偏移,偏移相对带宽为 90%,最小插入损耗为 0.1 dB。在屏蔽模式下,能够在整个工作频段 1~4.5 GHz 内实现良好的屏蔽效果。同时,本设计具备对不同极化波进行频率调谐的能力,在 45° 以内的入射角范围内,每种工作模式均表现出稳定可靠的性能。这些性能指标充分彰显了本设计在多个关键方面的出色表现。

表 2 与近年来其他设计性能对比

AFSS 设计	工作频段/ GHz	工作模式/ 个	可调谐种类/ 个	极化独立 调控	调频范围/ GHz	斜入射角度 稳定性/(°)	最小插入 损耗/dB
本文	1~4.5	9	2	是	1.54~4.16	45	0.1~0.8
文献[12]	1~7	2	1	否	N. A	45	0.3
文献[14]	2~7	2	1	否	N. A	30	0.54
文献[15]	0~3	2	1	否	0.28~1.28	40	N. A
文献[16]	1~6	4	1	是	N. A	45	N. A
文献[17]	1~6	7	1	是	N. A	45	N. A
文献[18]	2~10	1	1	否	2.92~4.66	30	4.5~1

3 结 论

本文设计一款有源频率选择表面具有双极化独立可调控可调频的特性。通过利用 PIN 二极管和变容二极管实现对 TE 和 TM 极化波的可调控和可调频的操作,在静

态 A 和 B 工作时,可以实现对 TE 和 TM 极化波的传输和屏蔽,在 C 和 D 模式下工作时,可以实现对两种极化波的独立调控。在动态工作时,可以实现对两种极化波传输通带从 1.54~4.16 GHz 的频率偏移。本设计采用多层 AFSS 技术手段实现多功能 AFSS,不仅能将功能可调谐与

频率可调谐相结合,更能够为AFSS结构在斜入射角度下提供稳定的性能,在45°斜入射角度下仍然能够保持稳定的工作特性。本设计在每种工作模式中展现出稳定的性能,各模式之间相互独立,互不影响。

参考文献

- [1] MUNK B A. Frequency-selective surfaces: Theory and design[M]. New York: Wiley, 2000.
- [2] LI B, SHEN Z. Synthesis of quasi-elliptic bandpass frequency-selective surface using cascaded loop arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 3053-3059.
- [3] ABADI M H, LI M, BEHDAD N. Harmonic-suppressed miniaturized-element frequency selective surfaces with higher order bandpass responses[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(5): 2562-2571.
- [4] FORD K, CHAMBERS B. Smart microwave absorber[J]. Electronics Letters, 2000, 36(1): 50-52.
- [5] 黎会鹏,黄璞,严保康.基于超表面的低插损频率选择吸波体的仿真设计[J].电子测量技术,2021,44(19):40-44.
- [6] EULER M, FUSCO V. Frequency selective surface using nested split ring slot elements as a lens with mechanically reconfigurable beam steering capability[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(10): 3417-3421.
- [7] LI M, AL-JOUMAYLY M, BEHDAD N. Broadband true-time-delay microwave lenses based on miniaturized element frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(3): 1166-1179.
- [8] 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.
- [9] MA Y, WU W, YUAN Y, et al. A wideband FSS based on vias for communication systems[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(12): 2517-2520.
- [10] ZENG X, GAO M, ZHANG L, et al. Design of a tunable and broadband absorber using a switchable transmissive/reflective FSS [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2018, 12(7): 1211-1215.
- [11] HUANG X, SHEN Z, FENG Q, et al. Tunable 3-D bandpass frequency-selective structure with wide tuning range[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(7): 3297-3301.
- [12] BAKSHI S C, MITRA D. Design and analysis of a bi-functional ground plane with true reconfigurability[J]. Electronics Letters, 2019, 55(4): 214-216.
- [13] PHON R, GHOSH S, LIM S. Novel multifunctional reconfigurable active frequency selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(3): 1709-1718.
- [14] LI R M, HU H Q, TIAN J, et al. Switchable absorber with high-order frequency selective surface for transmission bandwidth extension[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(6).
- [15] GHOSH S, SRIVASTAVA K V. A dual-band tunable frequency selective surface with independent wideband tuning[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(10): 1808-1812.
- [16] SHAH G, CAO Q, DAYO Z A, et al. Double layer multifunction frequency selective surface equipped with a tricharacteristic response[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64 (2): 295-302.
- [17] SHAH G, CAO Q, ABIDIN Z U, et al. A 4-bit multistate frequency-selective surface with dual-band multifunction response [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20 (10): 1844-1848.
- [18] GUO Q, LI Z, SU J, et al. Active frequency selective surface with wide reconfigurable passband[J]. IEEE Access, 2019, 7: 38348-38355.

作者简介

王哲飞(通信作者),博士,讲师,主要研究方向为电磁超构表面、天线传播、电磁隐身技术等。

E-mail: wang_zhefei@126.com