

DOI:10.16136/j.joel.2023.07.0354

双频带柔性极化转换超表面的仿真研究

张 镭¹, 张欣航², 张易成², 盛子腾², 韩连福³, 付长风^{2*}

(1. 东北石油大学 物理与电子工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 常熟理工学院 电子信息工程学院, 江苏 苏州 215500; 3. 常熟理工学院 电气与自动化工程学院, 江苏 苏州 215500)

摘要: 针对刚性介质基板材料难以弯曲共形以及宽带宽、高极化转换效率 (polarization conversion ratio, PCR) 和小型化极化转换器的应用需求, 本文提出一种双宽频带、高 PCR 的柔性极化转换超表面。所设计的超表面由金属图案层、柔性介质层和金属接地板组成。仿真结果表明, 该超表面在 8.52—13.35 GHz 和 15.12—19.54 GHz 频带内将线极化波极化方向旋转 90°, PCR 分别为 96.50% 和 98.43%, 相对带宽分别为 44.21% 和 25.51%。通过改变柔性介质层厚度调控双频带极化转换性能。对谐振频率处的表面电流进行仿真, 分析了双频带和高 PCR 的机理。此外, 研究该超表面的 PCR 对入射角和极化方式的依赖性, 结果表明该超表面在 0—30° 入射角内具有较好的双频带极化转换性能, 且具有极化不敏感性。所提出的双频带柔性极化转换超表面在电磁波极化调控应用中拥有巨大潜力。

关键词: 双频带; 极化转换; 柔性; 超表面

中图分类号: O441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)07-0690-08

Simulation study of dual-band and flexible polarization conversion metasurface

ZHANG Lei¹, ZHANG Xinhang², ZHANG Yicheng², SHENG Ziteng², HAN Lianfu³, FU Changfeng^{2*}

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou, Jiangsu 215500, China; 3. School of Electrical and Automation Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou, Jiangsu 215500, China)

Abstract: For rigid dielectric substrate materials, it is difficult to bend conformally. In order to meet the application requirements of broadband, high polarization conversion ratio (PCR) and miniaturization of polarization converter, a dual broadband, high PCR flexible polarization conversion metasurface is proposed in this paper. The designed metasurface is composed of metal pattern layer, flexible dielectric layer and metal ground plate. The simulation results show that the metasurface can rotate the polarization direction of the linear polarization wave by 90° in the frequency bands of 8.52—13.35 GHz and 15.12—19.54 GHz. PCRs are 96.50% and 98.43%, and the corresponding relative bandwidths are 44.21% and 25.51%, respectively. The dual-band polarization conversion performance is manipulated by changing the thickness of flexible dielectric layer. The surface current at the resonant frequency is simulated, and the mechanisms of dual-band and high PCR are analyzed. In addition, the dependence of PCR on incident angle and polarization mode of the metasurface are studied. The results show that the proposed metasurface has good dual-band polarization conversion performance and also has polarization insensitivity within 0° to 30°. The proposed dual-band flexible polarization conversion metasurface has great potentials in the application of electromagnetic wave polarization regulation.

Key words: dual-band; polarization conversion; flexibility; metasurface

* E-mail: lianfuhan@nepu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-14 修订日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51774092)、黑龙江省自然科学基金(LH2020E012)和江苏高校“青蓝工程”(20220102)资助项目

0 引言

极化作为电磁波固有的特性之一,在电磁波调控方面发挥着重要作用。如今它已经广泛应用于许多领域之中,包括有线通信^[1]、无线通信^[2]、液晶显示、雷达散射截面(radar cross section, RCS)缩减^[3]、生物检测^[4]、不对称传输等。然而,传统的极化调控器件大多是通过法拉第效应和双折射晶体实现^[5],因此存在设计过程复杂、结构单一、整体结构厚重、对材料和加工工艺要求高、只能按照固定的模式工作、带宽窄等缺点。超表面的提出为这一系列问题提供了可行的解决方案,它具有相对轻薄、损耗低、低剖面和小尺寸等优点^[6]。超表面不仅能够实现对光场的振幅、相位、偏振态和角动量等参数的灵活调控,还能使入射电磁波照射到分界面时产生相位不连续的情况,从而实现电磁波的异常折射与反射,进而达到对电磁波调控的目的^[7]。超表面二维材料的产生既涵盖了三维材料的奇异特性,同时还能解决三维材料自身的缺陷,使制作工艺变得相对简单。到目前为止,超表面可以是全介质表面、印刷结构和全金属结构的形式,在波束控制、增益增强和雷达隐身领域都具有巨大的应用潜力^[8]。

通过超表面来灵活有效地对电磁波实施调控、获得高极化转换效率(polarization conversion ratio, PCR)和宽工作带宽目前仍是研究人员持续探索的课题。例如,哈佛大学 YU 等^[9]首次提出“广义斯涅尔定律”,设计了一种 V 型阵列的相位梯度超表面,成功实现对散射电磁波的相位调控。LI 等^[10]设计了一种超宽带、多用途和可切换线性极化转换器;文献^[11]中提出了一款高效、宽频带反射型超表面线极化转换器。虽然这些工作在一定程度内得到较高的线性极化转换,但都是在单频带内实现的,故具有一定局限性,而双频带的提出带来了更广阔的应用前景。文献^[12]中设计了一种双频带线-圆极化转换器,在 19.40—21.80 GHz 和 27.90—30.50 GHz 两个频带内能够实现较好的转换,但是它的相对带宽较窄,且结构设计较为复杂,使制造工艺的过程变得相对繁琐。文献^[13]设计了一种超薄的双频带极化转换器,但结构的中间介质层选用的为玻璃纤维环氧树脂覆铜板。一般超表面的介质基板都局限于刚性材料,大多数研究成果却并没有提到柔性材料。LAN 等^[14]设计了一种可调谐的柔性全介质太赫兹超表面,但是作用于太赫兹频段,而在微波领域缺乏基于双频段柔性极化转换超表面的研究。使用柔性材料基板具备可弯曲、拉伸、旋转等特性。

因此,这也为电磁波的调控提供了一种新的途径。

本文提出了一种基于柔性超表面的高效双频带线性极化转换器。该极化转换器由金属图案层、两层柔性中间介质和一层金属接地板组成。该结构在 8.52—13.35 GHz 和 15.12—19.54 GHz 频带内将线极化波极化方向旋转 90°, PCR 分别为 96.50% 和 98.43%, 相对带宽分别为 44.21% 和 25.51%。通过改变柔性介质层厚度调控双频带极化转换性能,并揭示双频带和高 PCR 的机理。同时,研究该超表面的 PCR 对入射角和极化方式的依赖性。所提出的双频带柔性极化转换超表面在电磁波极化调控方面有巨大的应用潜力。

1 结构单元设计与仿真结果

1.1 结构单元设计

图 1 为所提出的极化转换超表面结构单元示意图。整个结构单元分为 4 层:金属图案层、介质层 1、介质层 2、金属接地板。顶层图案和底层地板为金属铜膜,厚度为 0.035 mm,电导率为 5.8×10^7 S/m。为确保整个结构的柔性,中间介质层为两种不同柔性材料。金属图案印刷在 0.08 mm 厚的聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)薄膜上,相对介电常数为 2.86,损耗角正切为 0.053。在金属底板和 PET 介质层之间填充的是厚度为 2.85 mm 的聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC),其相对介电常数为 3,损耗正切角为 0.042。优化后的结构参数为: $a = 0.2$ mm, $b = 0.2$ mm, $c = 0.4$ mm, $t = 0.035$ mm, $h_1 = 0.08$ mm, $h_2 = 2.85$ mm, $p = 10$ mm, $R_1 = 4.32$ mm, $R_2 = 3.5$ mm, $w_1 = 0.19$ mm, $w_2 = 0.44$ mm, $\theta = 110^\circ$ 。

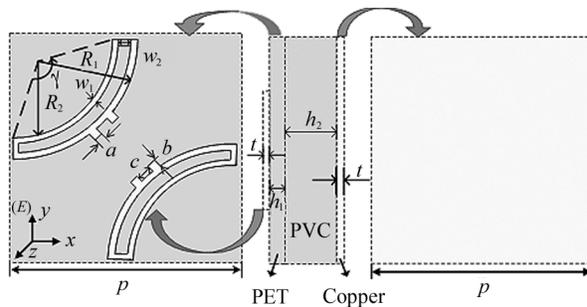


图 1 超表面基本单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the designed metasurface unit cell

1.2 理论分析及仿真

该设计使用电磁仿真软件 CST Microwave Stu-

dio 频域求解器进行单元模拟。结构单元的边界条件在 x 和 y 轴方向上设置为周期边界条件,沿 $-z$ 方向设置为电边界条件(electric($E_t = 0$)),沿 $+z$ 方向设置为开放边界条件(open add space),入射电磁波为平面波。广义反射矩阵能够很好地描述所提出的线性极化转换器性能,它的定义如下:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$r_{yy} = \frac{|E_{yr}|}{|E_{yi}|} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 + \cos(\Delta\phi)}, \quad (2)$$

$$r_{xy} = \frac{|E_{xr}|}{|E_{xi}|} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - \cos(\Delta\phi)}, \quad (3)$$

式中, E 表示电场,下标 i 表示入射电磁波, r 表示反射电磁波, x 与 y 分别表示电磁波的极化方向, r_{yy} 和 r_{xy} 分别表示同极化和交叉极化反射系数。同极化表示反射波极化方向与入射波极化方向一致,而交叉极化则表示反射波极化方向与入射波极化方向相互正交,二者共同组成反射波。 $\Delta\phi$ 表示极化反射系数的相位差, E_{yr} 、 E_{xr} 和 E_{yi} 、 E_{xi} 分别表示反射波电场和入射波电场在 y 轴或 x 轴方向上的大小。通过等式(2)和(3)可知,当 $\Delta\phi$ 等于 $\pm\pi$ 时, $r_{yy} = 0$, $r_{xy} = 1$,表明 y 极化完全转换为 x 极化。 y 或 x 极化入射波经过单元表面反射后转化为 x 或 y 极化波的 PCR 可定义为:

$$PCR_y = \frac{r_{xy}^2}{r_{xy}^2 + r_{yy}^2}, PCR_x = \frac{r_{yx}^2}{r_{yx}^2 + r_{xx}^2}, \quad (4)$$

式中, r_{xy} 和 r_{yy} 分别表示为交叉极化和同极化的反射

系数。若 PCR 的值等于 1,则可实现 y 极化与 x 极化电磁波之间的完美转换。

图 2(a)和 2(b)分别给出了 6—21 GHz 频段内同极化反射系数 r_{yy} 、交叉极化反射系数 r_{xy} 及 PCR 的数值模拟结果。由图 2(a)可知,在 8.52—13.35 GHz 和 15.12—19.54 GHz 频带范围内满足 r_{yy} 小于 -10 dB, r_{xy} 大于 -1 dB。此外,在 9.19 GHz、12.55 GHz 和 17.67 GHz 出现 3 个谐振点。如图 2(b)所示,在这两个频带范围内,PCR 的平均值分别能达到 96.50% 和 98.43%,相对带宽分别能达到 44.21% 和 25.51%,且 3 处谐振点的转换率分别能达到 99% 以上,接近于 1,说明 y 极化入射波几乎可以完全转化为 x 极化反射波。

表 1 给出本文所提出的设计与其他双频带极化转换超表面结果。由表 1 可知,文献[15]获得两个较宽的相对带宽,但使用的是刚性介质材料 F4B-2;文献[16]获得较宽的相对带宽,但局限于单频带。而本文使用的柔性介质材料 PET 和 PVC,大大提高了超表面的柔性,同时为电磁波的调控提供了一种新的途径。

为更好地理解反射电磁波的极化状态,定义反射波椭圆角为 η ,极化角为 θ 。当入射波垂直入射到超表面时, η 和 θ 的定义为^[17]:

$$\eta_{y,x} = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{2|\tau_{y,x}| \sin(-\Delta\phi_{y,x})}{1 + |\tau_{y,x}|^2} \right], \quad (5)$$

$$\theta_{y,x} = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2|\tau_{y,x}| \cos(\Delta\phi_{y,x})}{1 - |\tau_{y,x}|^2} \right], \quad (6)$$

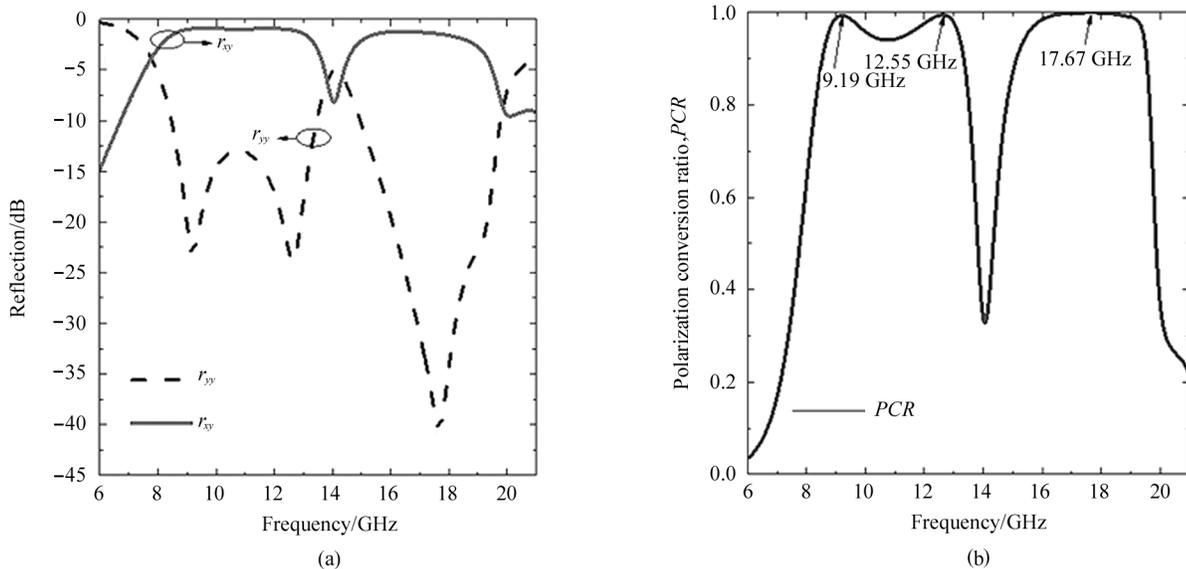


图 2 y 极化波正入射时的仿真结果:(a) 同极化反射系数(r_{yy})和交叉极化反射系数(r_{xy}); (b) PCR

Fig. 2 Simulation results when the y -polarized wave is normally incident:

(a) Co-polarization reflections coefficient (r_{yy}) and cross-polarization reflections coefficient (r_{xy}); (b) PCR

表 1 本文所提出的设计与其他双频带极化转换超表面结果对比

Tab.1 The proposed design is compared with the results of other dual-band polarization conversion metasurface

Article	Operating bandwidth/GHz	Relative bandwidth/%	Dielectric layer	Single or dual-band
Ref. [13]	4.35—5.05/9.88—14.23	14.89/36.08	FR4	Dual
Ref. [15]	9.38—13.36/14.84—20.36	35.0/31.36	F4B-2	Dual
Ref. [16]	14.40—33.30	79.20	F4B, air	Single
Ref. [18]	5.70—8.62/13.30—15.70	40.78/16.55	FR4	Dual
This work	8.52—13.35/15.12—19.54	44.21/25.51	PET, PVC	Dual

式中, $\tau_y = \frac{r_{xy}}{r_{yy}}$ (或 $\tau_x = \frac{r_{yx}}{r_{xx}}$), 相位差 $\Delta\phi_y = \text{Arg}(r_{xy}) - \text{Arg}(r_{yy})$ (或 $\Delta\phi_x = \text{Arg}(r_{yx}) - \text{Arg}(r_{xx})$) 表示 x 极化与 y 极化反射波之间的相位差 (或 y 极化与 x 极化反射波之间的相位差)。图 3(a) 和 3(b) 分别为利

用等式 (5) 和 (6) 计算得到的椭圆角与方位角的取值范围。在整个工作频带范围内, 椭圆角接近于 0° , 方位角能够保持在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 之间, 说明此极化转换超表面能沿 y (或 x) 轴方向的线极化入射波几乎完全转化为沿 x (或 y) 轴方向的线极化反射波。

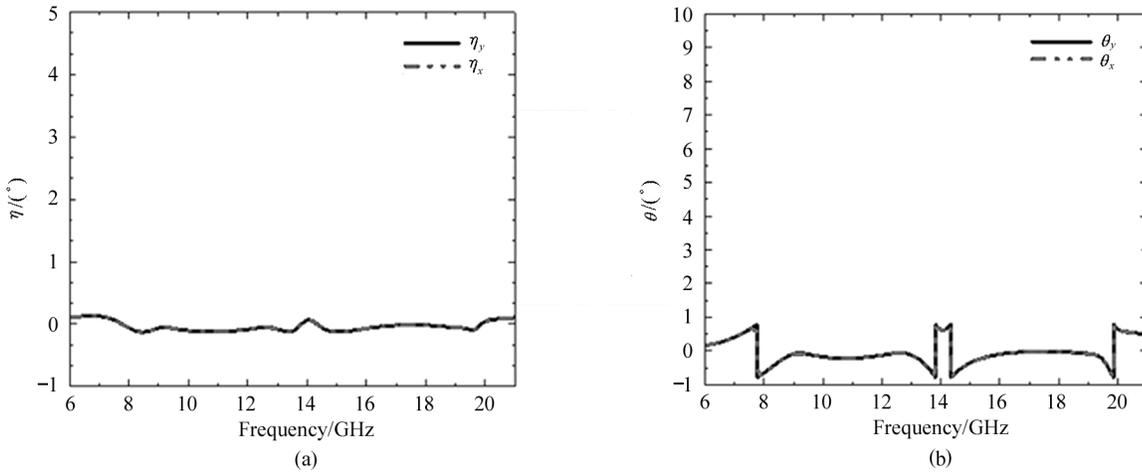


图 3 y 极化和 x 极化入射下的椭圆角 η 和极化角 θ : (a) 椭圆角 η ; (b) 极化角 θ

Fig. 3 Ellipticity η and polarization azimuth angles θ for y - and x -polarized incident waves: (a) Ellipticity η ; (b) Polarization azimuth angles θ

2 极化转换机理分析

为揭示超表面实现双宽带偏振转换的物理机制, 下面从理论、表面电流两个角度进行具体分析。

2.1 理论分析

将 x 轴和 y 轴分别逆时针旋转 45° 得到 u 轴和 v 轴, 如图 4(a) 所示。入射电场将入射波沿着 u 轴和 v 轴分解成两个分量:

$$E^i = E_u^i \hat{e}_u + E_v^i \hat{e}_v = \frac{\sqrt{2}}{2} E_y^i \exp(-ikz - i\omega t) (\hat{e}_u + \hat{e}_v) \quad (7)$$

当入射波通过极化转换器反射时, 反射波电场矢量的表达式如下:

$$E^r = E_u^r \hat{e}_u + E_v^r \hat{e}_v = (r_{uu} E_u^i + r_{uv} E_v^i) \hat{e}_u + (r_{vu} E_u^i + r_{vv} E_v^i) \hat{e}_v = \frac{\sqrt{2}}{2} E_y^i \exp(ikz - i\omega t) \times$$

$$[|r_{uu}| \exp(i\phi_{uu}) \hat{e}_u + |r_{uv}| \exp(i\phi_{uv}) \hat{e}_v] + \frac{\sqrt{2}}{2} E_y^i \exp(ikz - i\omega t) \times$$

$$[|r_{vu}| \exp(i\phi_{vu}) \hat{e}_v + |r_{vv}| \exp(i\phi_{vv}) \hat{e}_u] \quad (8)$$

式中, E_u^i 和 E_v^i 分别表示电场沿着 u 轴和 v 轴的复振幅分量, r_{uu} 、 r_{uv} 、 r_{vu} 、 r_{vv} 则分别表示 u 、 v 极化方向上各自的复反射系数, \hat{e}_u 、 \hat{e}_v 表示沿着 u 、 v 轴的单位矢量, ϕ_{uu} 、 ϕ_{vv} 、 ϕ_{uv} 、 ϕ_{vu} 则表示各轴极化方向上的反射相位。当交叉极化反射系数振幅 $r_{uv} = r_{vu} = 0$, 同极化 $r_{uu} = r_{vv} = 1$ 时, 反射电场的表达式如下:

$$E^r = \frac{\sqrt{2}}{2} E_y^i \exp(ikz - i\omega t) \times$$

$$[|r_{uu}| \exp(i\phi_{uu}) \hat{e}_u + |r_{vv}| \exp(i\phi_{vv}) \hat{e}_v] \quad (9)$$

图 4(b) 和 4(c) 分别给出同极化反射率 r_{uu} 、 r_{vv} 和交叉极化反射率 r_{uv} 、 r_{vu} 的变化趋势。由图 4(b) 可以

看出 r_{uu} 、 r_{vv} 的值接近于 1, 由于结构单元介质层具有一定的损耗, 导致同极化反射率中间一段数值存在较大的差距。由图 4(c) 可以看出 r_{uv} 、 r_{vu} 的值接近于零。相位差的公式定义如下:

$$\Delta\phi = \phi_{uu} - \phi_{vv} = (2n\pi + \pi), (n \in Z)。(10)$$

图 4(d) 给出 u 轴和 v 轴方向的同极化相位和相

位差。由图 4(d) 可知, 在 9.19 GHz、12.55 GHz 和 17.67 GHz 3 个谐振点处的相位差为 180° , 即在这些谐振点处 $\Delta\phi = 180^\circ$, 可以完全实现正交极化转换。当入射波极化方向沿 u 或 v 轴时, 此时只在 u 或 v 轴方向上有谐振响应, 这时反射波极化方向与入射波极化方向相同, 可以看到在 14.06 GHz 处相位差 $\Delta\phi$

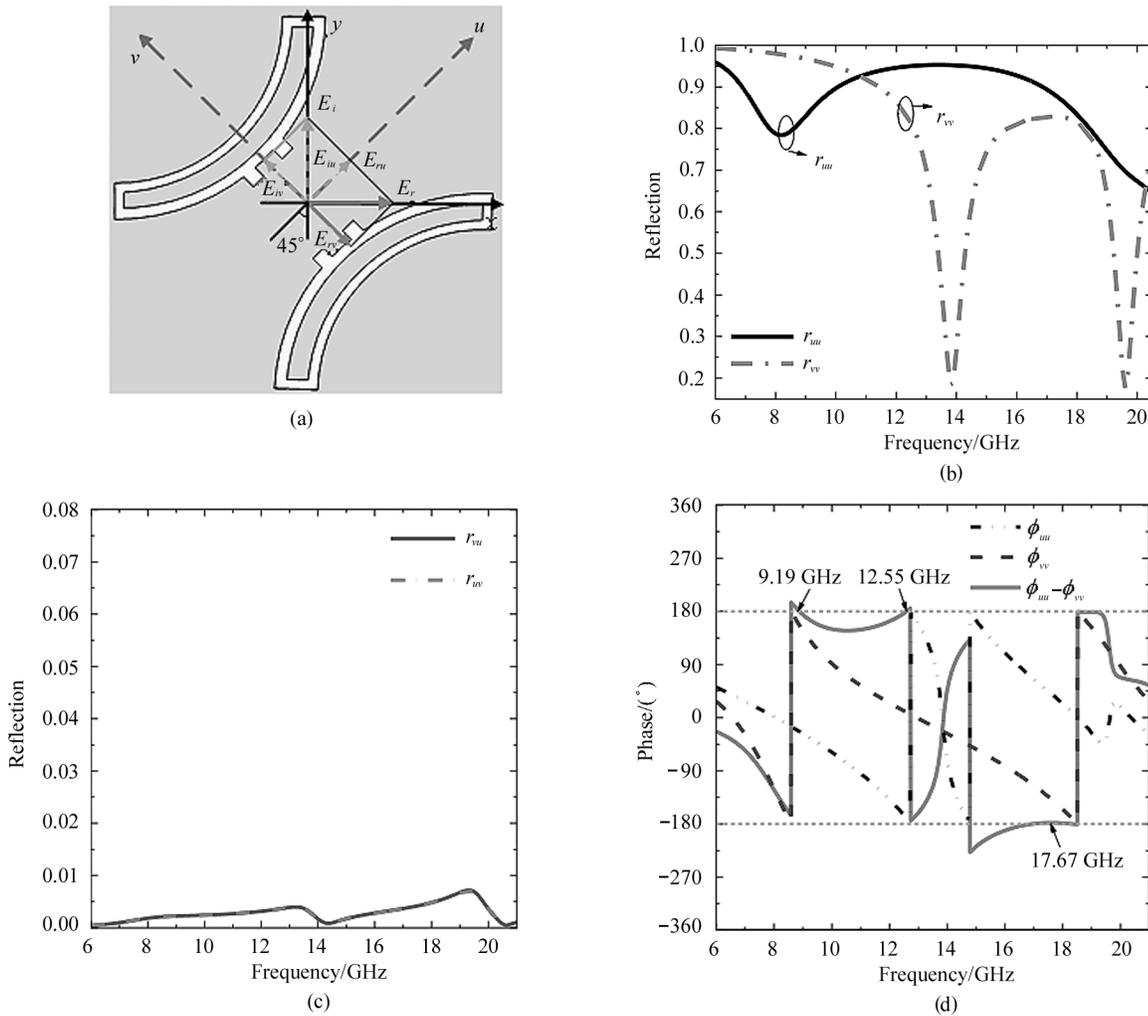


图 4 u 、 v 方向下的仿真结果: (a) 极化转换器 u 轴和 v 轴的定义; (b) 同极化反射系数; (c) 交叉极化反射系数; (d) 同极化相位及相位差

Fig. 4 Simulation results under the u and v directions: (a) Definition of u -axis and v -axis of polarization converter; (b) Co-polarization reflection coefficient; (c) Cross-polarization reflection coefficient; (d) Co-polarization phase and phase difference

$= 0^\circ$, 这表明在此频率处没有任何交叉极化反射。

2.2 表面电流分析

为了进一步阐明超表面极化转换的物理机制, 结构单元分别在 9.19 GHz、12.55 GHz 和 17.67 GHz 3 个谐振点处模拟顶部和底部金属层的表面电流分布情况。这些谐振点处的谐振类型与感应电流

的流动方向有关。如图 5(a₁) 和 5(c₁) 所示, 在 9.19 GHz 和 17.67 GHz 处, 顶部金属图案层内环与外环表面感应电流方向互相平行, 产生电偶极子共振; 图 5(b₁) 给出 12.55 GHz 处, 金属图案层内环与外环表面电流方向相反, 产生磁偶极子共振。如图 5(a₂) 所示, 在 9.19 GHz 处金属底板表面电流与顶部表面电

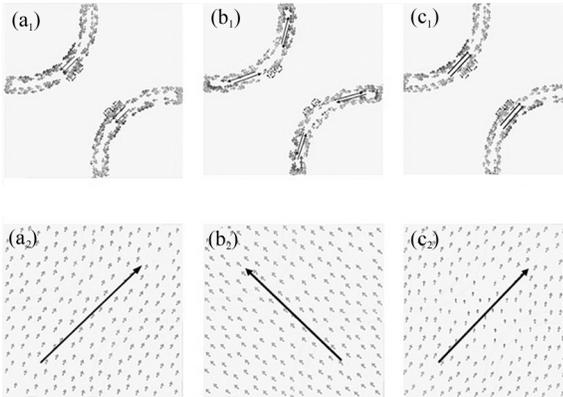


图 5 单元结构金属图案层和金属接地板表面电流分布情况:(a₁),(a₂) 9.19 GHz; (b₁),(b₂) 12.55 GHz; (c₁),(c₂) 17.67 GHz

Fig. 5 Surface current distribution on the proposed metal pattern layer and metallic ground plate at (a₁),(a₂) 9.19 GHz; (b₁),(b₂)12.55 GHz, and (c₁),(c₂)17.67 GHz

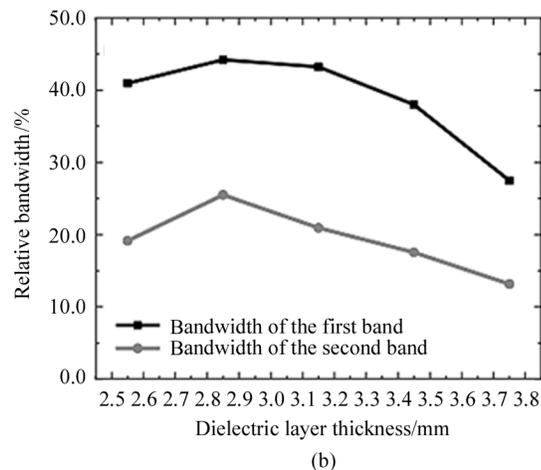
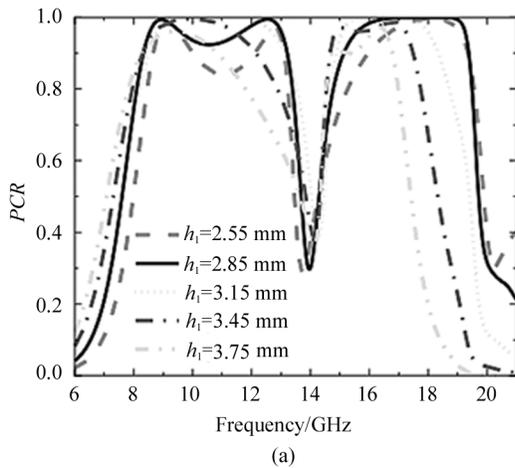


图 6 厚度 h_1 改变的情况下的 PCR 和相对带宽:(a) PCR; (b) 相对带宽

Fig. 6 PCR and relative bandwidth with varying thickness h_1 : (a) PCR; (b) Relative bandwidth

的相对带宽随 h_1 的增加先增大后减小,在第二个工作频带内随 h_1 的增加,相对带宽也同样先增大后减小。当 PVC 厚度为 2.85 mm 时,得到这两个频带内最大的相对带宽。

图 7 (a) 和 7(b) 为在介质层 PVC 厚度及其他参数保持不变的情况下,对 PET 厚度 h_2 进行参数扫描。随着介质层厚度增加,PCR 大于 90% 的相对带宽在第一个频带内逐渐减小,在第二个频带内先增大后减小。当 h_2 为 0.08 mm 时得到这两个频带内的最大相对带宽,表明介质层厚度对相对带宽有显著影响。

流分布相反,可构成一个磁谐振器;图 5(c₂) 中,在 17.67 GHz 处,金属底部与顶部的表面电流分布方向相同,可等效为电谐振器;在谐振点 12.55 GHz 处顶层和底层之间存在既相同又相反的表面电流,从而导致感应电场和磁场之间的交叉耦合。由此可见交叉极化反射的带宽主要由电共振和磁共振共同引起。

3 介质层厚度、极化方式和入射角度对极化转换特性的影响

为进一步探讨影响同极化反射系数的因素,对单元介质层厚度、极化方式以及入射角度进行数值模拟分析。

3.1 介质层厚度对极化转换特性的影响

如图 6(a) 和 6(b) 所示,在介质 PET 厚度和其他参数保持不变的情况下,对 PVC 厚度 h_1 进行参数扫描。可以观察到,在第一个频带内,PCR 大于 90%

基于以上分析,考虑 PCR 和两个工作频带的相对带宽时,可通过合理优化介质层厚度以实现出色的双频带性能。

3.2 极化方式和入射角度对极化转换特性的影响

在实际应用中,电磁波是通过斜入射的方式到达结构表面的。因此,还需考虑不同入射角度是否对极化转换性能造成一定影响,而不仅仅是在垂直入射情况下。图 8 为不同模式和不同入射角下的同极化与交叉极化反射系数,入射角增加步长为 10°。当入射角从 0° 逐渐增加到 30° 时,在第一工作频带内两种模式下的同极化反射系数和交叉极化反射系数

几乎没有显著变化,第二频带内略有浮动,但依旧能在宽频带内得到良好保持。

图9给出了不同模式和入射角下的PCR变化情况。可以看到在TE、TM两种模式和30°以内斜入

射角角度下,PCR大于90%的带宽在第一频段几乎不受影响,在第二工作频段,随着入射角的增加略有下降,但在较宽的工作频段内仍能保持在90%以上。结果表明,该结构具有一定极化不敏感特性和角度

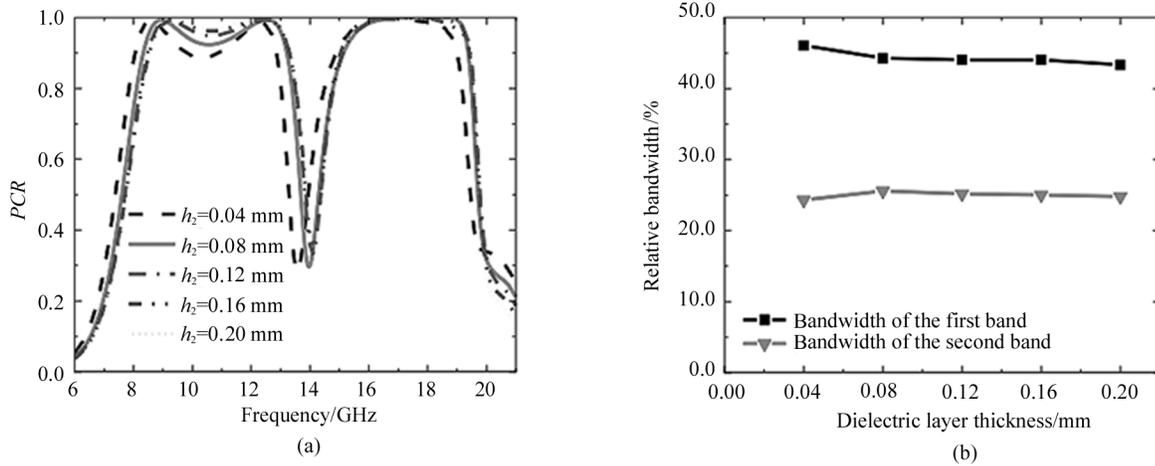


图7 厚度 h_2 改变情况下的PCR和相对带宽:(a) PCR; (b) 相对带宽

Fig. 7 PCR and relative bandwidth with varying thickness h_2 : (a) PCR; (b) Relative bandwidth

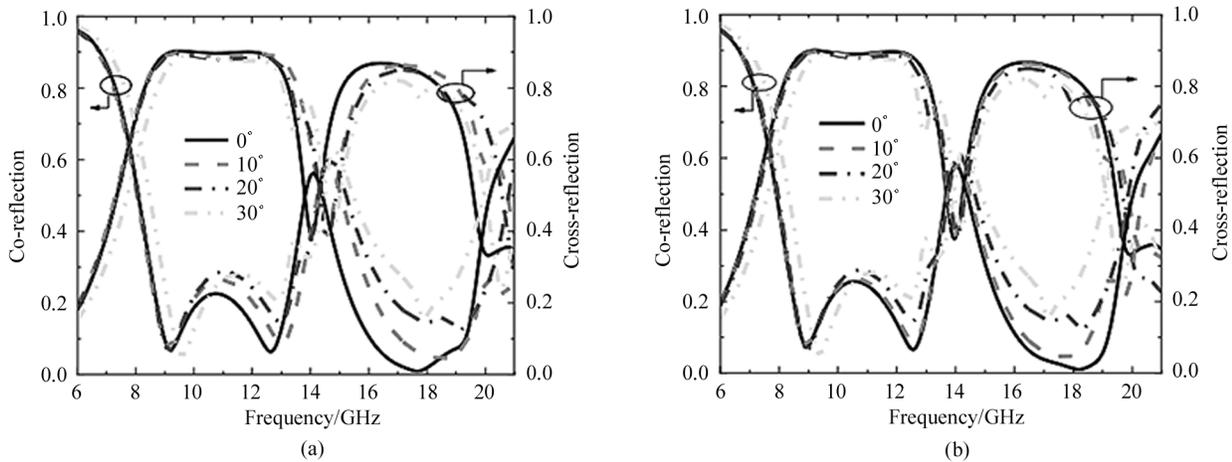


图8 不同模式下不同入射角同极化和交叉极化反射系数:(a) TE波; (b) TM波

Fig. 8 Co-polarized and cross-polarized reflection coefficients in different incident angles: (a) TE wave; (b) TM wave

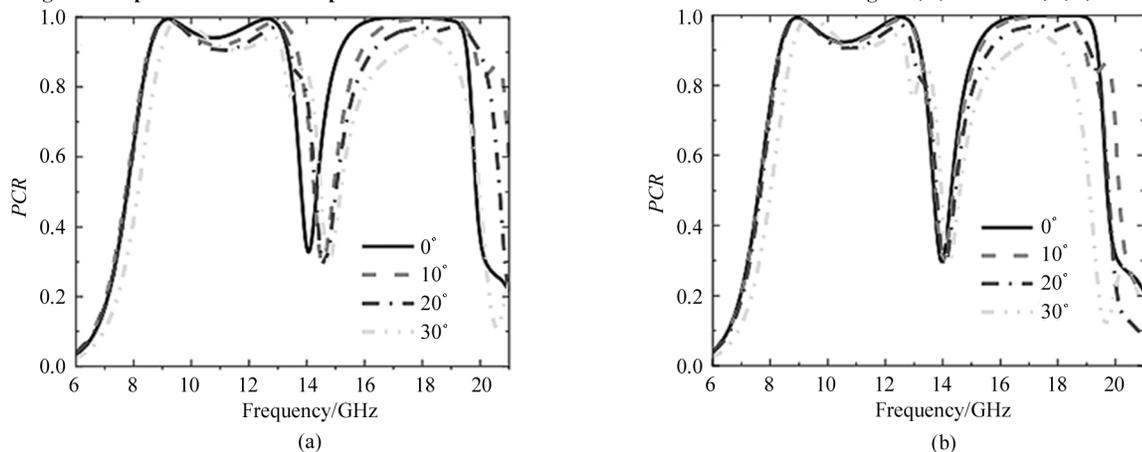


图9 不同模式和不同入射角的PCR:(a) TE波; (b) TM波

Fig. 9 PCR in different modes and incident angles: (a) TE wave; (b) TM wave

不敏感特性。

4 结 论

本文设计一种双频带柔性极化转换超表面。数值模拟研究表明,该超表面在 8.52—13.35 GHz 和 15.12—19.54 GHz 内可实现线极化转换,PCR 分别为 96.50%和 98.43%,相对带宽分别为 44.21%和 25.51%。正交极化反射带宽的增加主要起源于磁谐振和电谐振的叠加。当斜入射角达到 30°时,超表面能保持高效率 and 双宽带特性,体现很好的鲁棒性。与传统使用的刚性材料不同,使用柔性材料作为中间介质为实现电磁波调控提供了一种新思路,在微波通信、雷达探测、隐身技术等领域具有潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHENG Q, GUO C, DING J. Wideband and low RCS circularly polarized slot antenna based on polarization conversion of metasurface for satellite communication application[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, 60(3): 679-685.
- [2] LI Y, LIN J, GUO H, et al. A tunable metasurface with switchable functionalities: from perfect transparency to perfect absorption[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(6): 1901548.
- [3] FU C F, HAN L F, LIU C, et al. Combining Pancharathnam-Berry phase and conformal coding metasurface for dual-band RCS reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 2352-2357.
- [4] ZHANG H C, ZHANG Z J, MA X L, et al. Polarization multiplexing metasurface for dual-band achromatic focusing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 12069-12079.
- [5] MEISSNER T, WENTZ F J. Polarization rotation and the third Stokes parameter: the effects of spacecraft attitude and Faraday rotation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(3): 506-515.
- [6] PAN W, WANG X Y, CHEN Q, et al. Design of multi-channel terahertz beam splitter based on Z-shaped metasurface[J]. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16: 437-440.
- [7] ZHANG L, WANG Q, MENG W. Dual-band absorption enhancement of monolayer transition-metal dichalcogenides in metamaterials[J]. *Optoelectronic Letter*, 2021, 17: 412-417.
- [8] FU C F, DONG S H, HAN L F. Design of high-efficient broadband dual-polarization converter based on metasurface[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2022, 33(7): 686-693.
- [9] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [10] LI Y, CAO Q, WANG Y. A wideband multifunctional multi-layer switchable linear polarization metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(7): 1314-1318.
- [11] WANG Z, LUO Y, KOU J Q, et al. Design of broadband high efficiency linear polarization converter based on metasurface[J]. *Electronic Components and Materials*, 2021, 40(2): 163-167.
汪竹, 罗燕, 寇家琪, 等. 基于超表面的宽带高效线极化转换器设计[J]. *电子元件与材料*, 2021, 40(2): 163-167.
- [12] NASERI P, MATOS S A, COSTA J R, et al. Dual-band dual-linear-to-circular polarization converter in transmission mode application to K/Ka-band satellite communications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(12): 7128-7137.
- [13] HUANG X, YANG H, ZHANG D, et al. Ultrathin dual-band metasurface polarization converter[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(7): 4636-4641.
- [14] LAN C, DI Z, GAO J, et al. Flexible and tunable terahertz all-dielectric metasurface composed of ceramic spheres embedded in ferroelectric/elastomer composite: erratum [J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19043.
- [15] FU C F, SUN Z J, HAN L F, et al. High-efficiency dual-frequency reflective linear polarization converter based on metasurface for microwave bands[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1910.
- [16] LIU J, LI J Y, DU B. Antenna RCS reduction based on wideband polarization conversion metasurface[J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(2): 231-237.
刘洁, 李建瀛, 杜彪. 基于宽带极化转换超表面的天线 RCS 缩减[J]. *无线电工程*, 2022, 52(2): 231-237.
- [17] GOU Y, MA H F, WANG Z X, et al. Dual-band chiral metasurface for independent controls of spin-selective reflections[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 12775-12787.
- [18] YANG D, LIN H, HUANG X. Dual broadband metamaterial polarization converter in microwave regime[J]. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2016, 61: 71-76.

作者简介:

付长风 (1980—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事超构表面设计、表征及电磁波散射特性调控等方面的研究。