

doi:10.13682/j.issn.2095-6533.2026.05.005

面向通感一体化的 PB 相位宽频编码智能超表面设计方案

陈国强¹, 贺延军², 李胜², 赵强², 李新民³, 李培煊⁴, 黄晓俊³, 陈睿博³

(1. 延安车村煤业(集团)有限责任公司, 陕西 延安 717300; 2. 富县矿业开发有限公司芦村二号煤矿分公司, 陕西 富县 727502;
3. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054; 4. 西安科技大学 安全工程与科学学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为满足通感一体化应用中对宽频反射调控的需求, 针对反射型超表面极化转换带宽受限以及波束调控与散射抑制难以兼顾的问题, 提出一种基于潘查拉特南-贝里(Pancharatnam-Berry, PB)相位的宽频编码超表面设计方案。首先, 设计 M 型各向异性反射单元, 并通过单元旋转实现 PB 相位调控; 在此基础上构建 4×4 编码粒子, 进一步搭建 3 bit 编码阵列, 以实现反射波束的可控重构。随后, 采用全波电磁仿真对单元的反射幅度与相位响应、极化转换比(Polarization Conversion Ratio, PCR), 以及阵列的远场方向图和单站、双站雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)特性进行分析。结果表明, 所设计单元在 14.74~30.24 GHz 频段内 PCR 均大于 90%, 相对带宽超过 65%; 所构建编码阵列在 10.0~31.5 GHz 范围内实现了明显的 RCS 缩减, 最大缩减约 20 dB。该方案能够在宽频范围内兼顾高效极化转换、反射波束调控与后向散射抑制, 可为通感一体化系统中的反射波束赋形与回波散射调控提供参考。

关键词: 通感一体化; 编码超表面; 潘查拉特南-贝里相位; 极化转换; 波束调控

中图分类号: TN820

文献标志码: A

文章编号: 2095-6533(2026)05-0050-11

Wideband PB-phase coded intelligent metasurface design scheme for integrated sensing and communication

CHEN Guoqiang¹, HE Yanjun², LI Sheng², ZHAO Qiang², LI Xinmin³,
LI Peixuan⁴, HUANG Xiaojun³, CHEN Ruibo³

(1. Yan'an Checun Coal Industry (Group) Co., Ltd., Yan'an 717300, China;

2. Lucun No. 2 Coal Mine Branch of Fuxian Mining Development Co., Ltd., Fuxian 727502, China;

3. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology,

Xi'an 710054, China; 4. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and

Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To meet the demand for wideband reflection regulation in integrated sensing and communication applications, this paper proposes a wideband coded metasurface design based on the Pancharatnam-Berry (PB) phase to address the problems of limited polarization-conversion bandwidth in reflective metasurfaces and the difficulty of simultaneously achieving beam manipulation and scattering suppression. First, an M-shaped anisotropic reflective unit cell is designed, and PB-phase modulation is realized by rotating the unit cell. On this basis, a 4×4 coding particle is constructed and further extended into a 3-bit coding array to achieve controllable reconfiguration of the reflected beam. Subsequently, full-wave electromagnetic simulations are performed to ana-

收稿日期: 2026-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52574205); 陕西省重点研发计划项目(2022GD-TSLD-64)

通信作者: 黄晓俊, hxj@xust.edu.cn

引文格式: 陈国强, 贺延军, 李胜, 等. 面向通感一体化的 PB 相位宽频编码智能超表面设计方案[J]. 西安邮电大学学报, 2026, 31(5): 50-60.

CHEN Guoqiang, HE Yanjun, LI Sheng, et al. Wideband PB-phase coded intelligent metasurface design scheme for integrated sensing and communication[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2026, 31(5): 50-60.

lyze the reflection amplitude and phase responses, polarization conversion ratio (PCR), far-field radiation patterns, and monostatic and bistatic radar cross-section (RCS) characteristics of the proposed structure. The results show that the designed unit cell maintains a PCR higher than 90% over the frequency range of 14.74 GHz to 30.24 GHz, with a relative bandwidth exceeding 65%. In addition, the constructed coding array achieves significant RCS reduction over 10.0 GHz to 31.5 GHz, with a maximum reduction of about 20 dB. These results demonstrate that the proposed scheme can simultaneously realize efficient wideband polarization conversion, reflected-beam manipulation, and backscattering suppression over a wide frequency range, and can provide a useful reference for reflective beamforming and echo-scattering regulation in integrated sensing and communication systems.

Keywords: integrated sensing and communication; coded metasurface; Pancharatnam-Berry phase (PB phase); polarization conversion; beam manipulation

随着第五代移动通信及未来第六代移动通信技术的发展,通感一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)作为实现环境智能感知与高速信息传输融合的关键范式,正成为下一代无线网络的核心发展方向。在该背景下,可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为一种低成本、低功耗的新型电磁波调控技术,通过动态调控电磁环境,为提升通信质量、拓展感知能力提供了新路径。RIS本质上是一种由大量可调谐超表面单元构成的人工电磁结构,能够按需调节反射/透射波的相位、振幅和极化状态,从而实现对电磁波前的灵活操控,为智能反射环境、隐蔽通信与高精度感知等多功能集成应用奠定坚实的物理层基础^[1-3]。

电磁超表面作为二维形式的超材料,通过精心设计的亚波长金属结构单元激发局域电磁谐振,能够灵活调控入射电磁波的振幅、相位及极化状态,在极化转换、波束调控和隐身技术等领域已获得广泛应用^[4-9]。传统超表面通常依赖单元几何尺寸或形状的连续变化来实现相位调控,其性能高度依赖结构参数的精确设计,已在波束赋形^[10-13]、极化转换器^[14-18]和天线集成^[19-22]等方面得到广泛应用。

近年来,基于潘查拉特南-贝里(Pancharatnam-Berry, PB)相位理论的超表面设计方法受到广泛关注。该方法通过旋转各向异性单元的取向角引入PB相位,无需改变单元尺寸即可实现对圆极化波的高效调控,具有结构简单、鲁棒性强和易于编码等优势。Zhang等^[23]在微波频段(10~20 GHz)提出基于PB相位的编码超表面,实现了多极化多波束的灵活生成,为新型多波束系统开辟了新路径;

Chen等^[24]利用单一尺寸的波纹曲折线结构,通过调节方向角构建1位或多比特PB相位编码超表面,在宽频带内实现了偏振不敏感的扩散状反射;Ding等^[25]进一步将PB相位理论拓展至斜入射情形,实现了对异常反射方向的精确预测;Li等^[26]则将该机制成功应用于太赫兹波段(0.8~1.6 THz),验证了PB相位超表面在高频段的有效性;此外,Ding等^[27]通过引入双PB相位干涉机制,在超薄PB相位编码超表面上实现了复杂波前与空间功率分布的精准控制;Gou等^[28]在16~24 GHz宽带范围内,利用PB相位编码超表面将特定圆极化波定向反射至任意角度,同时有效抑制并随机扩散正交极化分量。上述工作充分体现了PB相位编码超表面在多功能电磁调控方面的巨大潜力。

本文围绕通感一体化应用对宽带可控反射波束与低可探测散射的需求开展研究。首先,基于PB相位调控机理设计M型反射型超表面单元,并分析其反射幅相响应与极化转换特性。其次,构建4×4编码粒子并进一步形成3 bit编码超表面阵列,实现不同编码序列下的波束指向调控与能量分散。最后,采用全波电磁仿真对单元级与阵列级性能进行验证,重点评估极化转换效率、远场方向图以及单站和双站雷达散射截面等指标,并讨论关键结构参数对宽频性能的影响,为后续面向通感一体化的编码超表面设计提供方法支撑。

1 编码超表面理论基础

一个编码超表面由 $N \times N$ 编码粒子组成,每个编码粒子由 $M \times M$ 编码基本单元组成,编码超表面调控原理如图1所示。

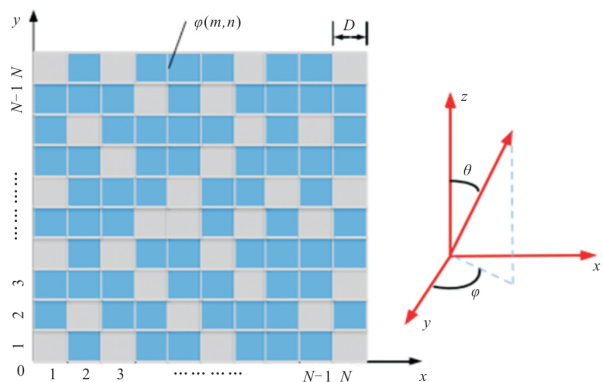


图1 编码超表面调控原理

由于编码超表面由等效均匀结构组成,可以将其视为无源阵列天线,而将编码元视为子阵列天线。当平面波入射到 PB 相位编码超表面时,超表面远场函数 $F(\theta, \varphi)$ 可表示为^[23-24]

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \exp \left\{ -i \left(k_0 D_x \left(m - \frac{1}{2} \right) \sin \theta \cos \varphi \right) + m\pi \right\} \cdot \sum_{n=1}^N \exp \left\{ -i \left(k_0 D_y \left(n - \frac{1}{2} \right) \cos \theta \sin \varphi \right) + n\pi \right\} \quad (1)$$

式中: k_0 为波矢量; $\varphi(m, n)$ 为每个编码阵列的反射相位; D_x 与 D_y 分别为 x 、 y 方向上编码元周期长度大小; θ 为俯仰角; φ 表示方位角。且有

$$\begin{cases} \varphi = \pm \arctan \left(\frac{D_x}{D_y} \right) \text{ 或 } \varphi = \pi \pm \arctan \left(\frac{D_x}{D_y} \right) \\ \theta = \arcsin \left(\lambda \sqrt{\frac{1}{D_x^2} + \frac{1}{D_y^2}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

当编码超表面设计为沿 x 轴或 y 轴方向的周期编码序列时,俯仰角可表示为^[25]

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\lambda}{\Gamma} \right) \quad (3)$$

式中: Γ 为周期长度。

假设沿 $-z$ 方向传播的右旋圆极化 (Right-Handed Circularly Polarized, RCP) 波垂直入射到一个 PB 相位单元上,将 PB 相位单元以 θ 角逆时针旋转, x - y 坐标转化为 u - v 坐标,在 u - v 坐标中,入射波 E_{inc} 为^[27-28]

$$E_{\text{inc}} = (\hat{u} + j\hat{v}) e^{jk_z z} e^{j\theta} \quad (4)$$

对应的反射波电场 E_{ref} 表示为

$$E_{\text{ref}} = \frac{1}{2} \left[(r_x \hat{x} - j r_y \hat{y}) (e^{j\varphi_x} - e^{j\varphi_y}) e^{j2\theta} + (r_x \hat{x} + j r_y \hat{y}) (e^{j\varphi_x} + e^{j\varphi_y}) \right] e^{-jk_z z} \quad (5)$$

式中: $\hat{k}$ 为自由空间中的波数; r_x 和 r_y 分别表示 x 极化波和 y 极化波的反射率; φ_x 和 φ_y 分别为 x 极化波和 y 极化波的反射相位。

反射波由 RCP 波和左旋圆极化 (Left-Handed Circularly Polarized, LCP) 波两个分量组成,当 $|\varphi_x - \varphi_y| = \pi$ 时,分别有

$$E_{\text{ref(RCP)}} = \frac{1}{2} r_x (\hat{x} - j\hat{y}) e^{j\varphi_x} e^{-jk_z z} e^{j2\theta} \quad (6)$$

$$E_{\text{ref(LCP)}} = 0 \quad (7)$$

由此得知反射波只有 RCP 分量,且相位变化为 2θ ,是旋转角度的两倍。

2 基本单元的设计及性能分析

本节围绕所提出的 M 型反射型编码超表面基本单元开展结构设计与性能验证。首先给出单元的三层构型、材料选取及关键几何参数设置,并通过对基板厚度与单元周期等敏感参数的扫描优化确定满足宽带工作的结构基准;随后基于全波仿真结果,从共极化与交叉极化反射特性、谐振点分布以及极化转换率等指标对基本单元进行定量评估,为后续多比特编码构建与阵列级波束调控设计提供可靠的幅度与相位响应依据。

2.1 M 型编码超表面基本单元结构设计

论文设计的反射型编码超表面基本单元为 M 型结构,如图 2 所示。由 3 层组成:顶层金属贴片,中间层介质基板,底层金属接地板。顶层金属贴片和底层金属接地板均为铜材料,导电率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,厚度均为 0.035 mm。中间介质层采用 F4B 材料,其介电常数为 3.5,损耗正切值为 0.001,基本单元的厚度 h 与单元周期长度 P 的大小对仿真结果有较大的影响,对参数 h 和 P 扫描优化得到最优值: $h = 1.5 \text{ mm}$, $P = 4.0 \text{ mm}$ 。M 型金属贴片为对称结构其尺寸为: $L = 2.64 \text{ mm}$, $w = 0.36 \text{ mm}$, $x = 1.68 \text{ mm}$, $e = 0.48 \text{ mm}$,位于介质基板中心位置,如图 2(b)所示。

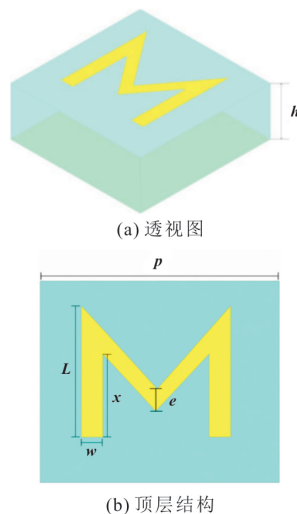


图2 超表面基本单元

2.2 基本单元性能分析

对设计的 M 型超表面基本单元在频率 10.0 ~

31.5 GHz 仿真。仿真结果如图 3 所示,其中 r_{LL} (r_{RR}),表示在 LCP 波(RCP 波)入射下的共极化反射系数, r_{RL} (r_{LR})表示在 LCP 波(RCP 波)入射下的交叉极化反射系数。在频率 14.74~30.24 GHz 范围内 r_{RL} 接近 0 dB, r_{LL} 值较小,小于 -10 dB,说明 LCP 波入射后高效转化为 RCP 波。

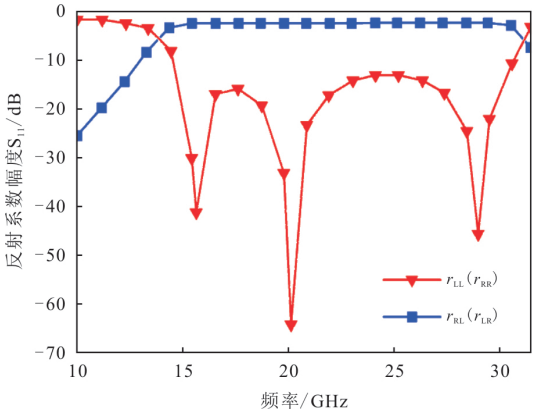


图 3 基本单元反射系数幅度响应

图 3 中,15.4 GHz、19.9 GHz 和 28.8 GHz 3 处取得谐振,极化转换效率较高。

极化转换率是描述极化转换性能的常用指标,值越大表明极化转换效率越高。为简化表示,设左旋圆极化波入射时的交叉极化反射系数和共极化反射系数分别为 a 和 b ,右旋圆极化波入射时的交叉极化反射系数和共极化反射系数分别为 c 和 d ,则左/右旋圆极化波的极化转换率分别为

$$R_L = \frac{a^2}{a^2 + b^2} \tag{8}$$

$$R_R = \frac{c^2}{c^2 + d^2} \tag{9}$$

图 4 为基本单元极化转化率曲线,图 4 中,在 14.74~30.24 GHz 内基本单元极化转化率在 90% 以上,相对带宽超过 65%,并且 3 处谐振频率基本一致,设计的基本单元具有宽带高效极化转换率。

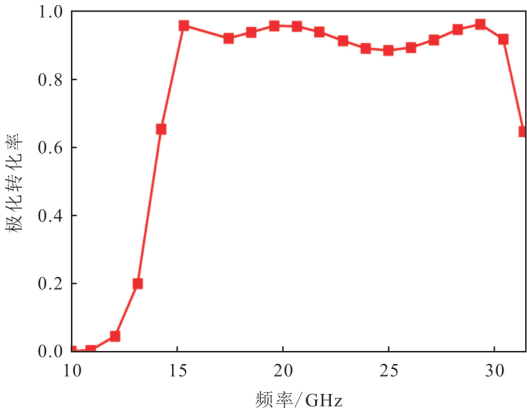


图 4 极化转换率

由图 3 和图 4 可以看出,该单元在宽频范围内具有较高的极化转换效率。其主要原因在于,所设计的 M 型金属贴片具有较强的各向异性特征,在两个正交方向上能够产生不同的电磁响应,为极化转换的实现提供了必要条件。同时,M 型结构的多分支电路路径可激发多个相邻谐振点,在 15.4 GHz、19.9 GHz 和 28.8 GHz 附近形成多谐振响应,这些谐振在频域上的叠加与耦合拓宽了单元的高效工作带宽。另外,顶层贴片与金属地板之间的耦合作用也有助于在较宽频段内保持较高的交叉极化反射幅度和稳定的相位响应,从而保证了宽带高 PCR 特性。对于该结构而言,基板厚度 h 、单元周期 P 等参数还会进一步影响单元的等效电磁参数及耦合状态,并最终反映为谐振位置和带宽范围的变化,因此需要结合参数扫描对结构进行优化设计。

3 编码超表面的设计与仿真分析

在完成基本单元宽带极化转换特性的确认后,本节进一步面向阵列级电磁调控给出编码超表面的构建方法与仿真验证流程。首先依据 PB 相位机理建立单元旋转角与离散相位态的对应关系,并给出从 1 bit 扩展至 3 bit 的编码单元构造原则;随后设计具有不同相位梯度与序列排布特征的 3 bit 编码超表面结构;最后在不同入射极化条件下对远场方向图与散射场分布进行对比分析,验证仿真结果与理论预测的一致性,为后续雷达散射截面缩减应用提供阵列设计依据。

3.1 基于 PB 相位理论的结构设计

由 PB 相位理论可知,相位变化与顶层金属贴片的旋转角度有简单的线性关系,即旋转 α 角的编码基本单元可以实现 $\pm 2\alpha$ (“+”和“-”分别表示 LCP 波和 RCP 波)的相位变化。同时,设计的 PB 相位编码超表面可以从 1 bit 扩展到多比特。

对于 1 bit 编码超表面,需要 2 个相位为 0° 和 180° 的编码基本单元,2 bit 编码超表面需要 4 个编码基本单元,相邻编码基本单元之间的相位差为 90° ;3 bit 编码超表面需采用 8 个反射相位差固定为 45° 的编码基本单元模拟“000”“001”“010”“011”“100”“101”“110”“111”共 8 个数字位,旋转角从 0° 变化到 157.5° ,步宽为 22.5° 。顶层金属贴片的旋转角度与编码基本单元对应关系如表 1 所示。

表 1 旋转角度与编码基本单元对应关系

编码超表面	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°
基本单元								
1 bit	0				1			
2 bit	00		01		10		11	
3 bit	000	001	010	011	100	101	110	111

对 8 个编码基本单元的 S 参数仿真曲线分别如图 5 和图 6 所示,分别为 LCP 波垂直入射下基本单元交叉极化反射幅度值和相位值。从图中可以看出,不同旋转角的基本单元在 14.74 ~30.24 GHz 的宽频域内反射幅度相差不大,反射相位按照 45°阶跃递增。

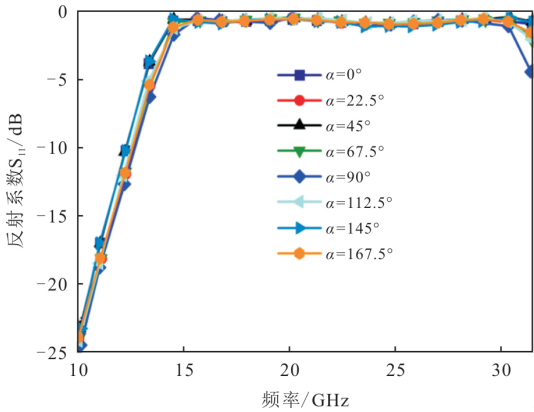


图 5 交叉极化幅度响应

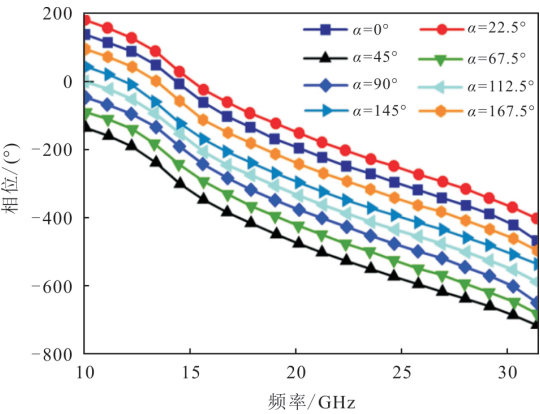


图 6 交叉极化相位响应

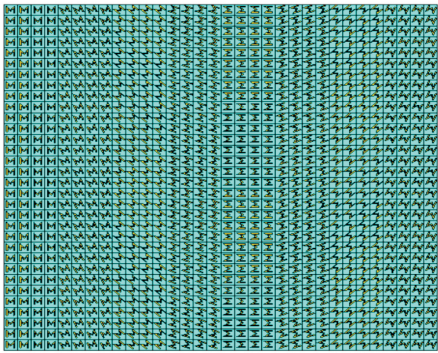
3.2 编码超表面的设计

本节基于广义斯涅尔定律和编码超表面散射理论设计了具有一定周期性的编码序列。为了减小相邻粒子的耦合效应,设定 4×4 编码基本单元作为编码粒子,则编码粒子物理周期长度 $\Gamma=4P=16\text{ mm}$ 。3 bit 编码超表面由 8×8 编码粒子构成。数字态“000”、“001”、“010”、“011”、“100”、“101”、“110”、“111”分别对应相位差为 45°的 8 个编码粒子。所设计的 3 种具有不同排列特性的 3 bit 编码超表面分别如图 7~图 9 所示。图 7(a)为沿 x 轴周期性排布的“000,

001,010,011,100,101,110,111...”序列,基于该序列设计的超表面 1 如图 7(b)所示。图 8(a)为沿 x 轴周期性排布的“000,001,010,011,100,101,110,111/100,101,110,111,000,001,010,011...”序列,图 8(b)为基于该序列设计的编码超表面,记为超表面 2;图 9(a)为沿 x 轴周期性排布“000,001,010,011,100,101,110,111/000,001,010,011,100,101,110,111/100,101,110,111,000,001,010,011...”序列,图 9(b)为基于该序列设计的编码超表面 3。

	x
y	000 001 010 011 100 101 110 111
	000 001 010 011 100 101 110 111
	000 001 010 011 100 101 110 111
	000 001 010 011 100 101 110 111
	000 001 010 011 100 101 110 111
	000 001 010 011 100 101 110 111
	000 001 010 011 100 101 110 111
	000 001 010 011 100 101 110 111

(a) 编码智能超表面1序列排布

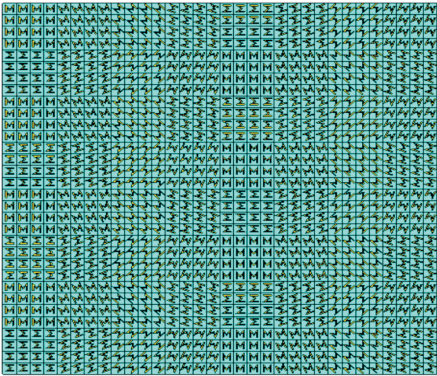


(b) 编码超表面1基本单元分布情况

图 7 超表面 1 编码分布

	x
y	000 001 010 011 100 101 110 111
	100 101 110 111 000 001 010 011
	000 001 010 011 100 101 110 111
	100 101 110 111 000 001 010 011
	000 001 010 011 100 101 110 111
	100 101 110 111 000 001 010 011
	000 001 010 011 100 101 110 111
	100 101 110 111 000 001 010 011

(a) 编码超表面2序列排布

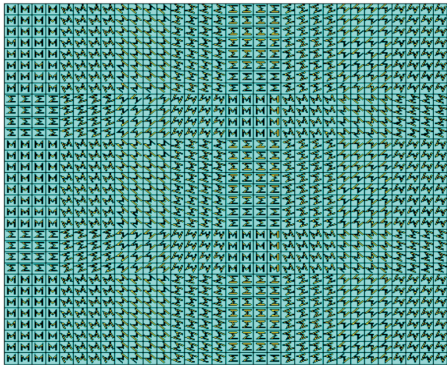


(b) 编码超表面2基本单元分布情况

图 8 超表面 2 编码分布

	x							
y	000	001	010	011	100	101	110	111
	000	001	010	011	100	101	110	111
	100	101	110	111	000	001	010	011
	000	001	010	011	100	101	110	111
	000	001	010	011	100	101	110	111
	100	101	110	111	000	001	010	011
	000	001	010	011	100	101	110	111
	000	001	010	011	100	101	110	111

(a) 编码超表面3序列排布



(b) 编码超表面3基本单元分布情况

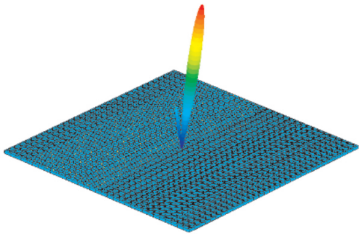
图 9 超表面 3 编码分布

3.3 编码超表面的波束调控仿真与分析

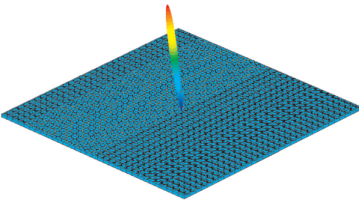
编码阵列的波束重构与 RCS 缩减结果建立在基本单元良好的幅相响应及高 PCR 特性基础之上。基本单元通过旋转可提供稳定的离散 PB 相位响应,从而支持阵列实现规则相位梯度下的波束调控,以及离散相位分布下的散射能量重分配与 RCS 缩减。

对设计的 3 bit 编码超表面(编码超表面 1、编码超表面 2 和编码超表面 3)在 15.4 GHz LCP 波、RCP 波、线极化(Linearly Polarized, LP)波垂直入射下进行仿真,超表面 1 的物理周期长度 $\Gamma_1=8\Gamma=8\times16\text{ mm}$;超表面 2 的 $\Gamma_2=2\Gamma=2\times16\text{ mm}$;超表面 3 的 $\Gamma_{3,x}=8\Gamma=8\times16\text{ mm}$, $\Gamma_{3,y}=3\Gamma=3\times16\text{ mm}$ 。

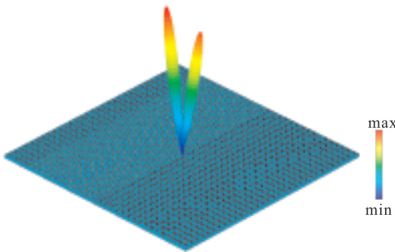
超表面 1 在不同极化波垂直入射下的三维远场和电场散射结果分别如图 10 和图 11 所示。



(a) LCP波垂直入射时的远场

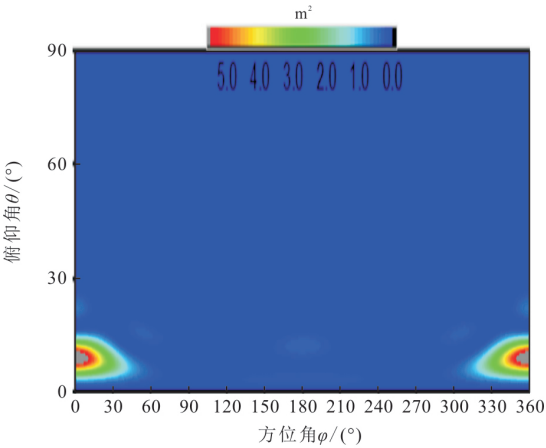


(b) RCP波垂直入射时的远场

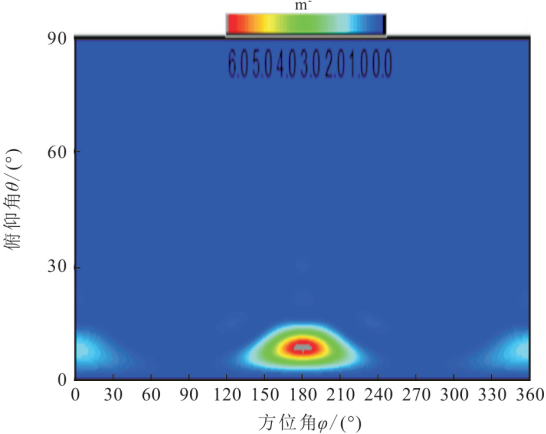


(c) LP波垂直入射时的远场

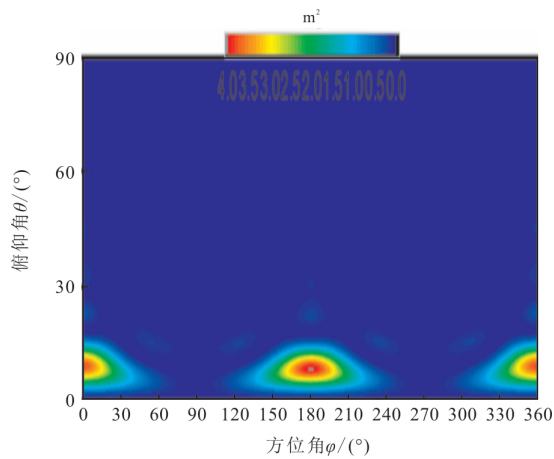
图 10 超表面 1 远场



(a) LCP波垂直入射的电场散射图



(b) RCP波垂直入射的电场散射图

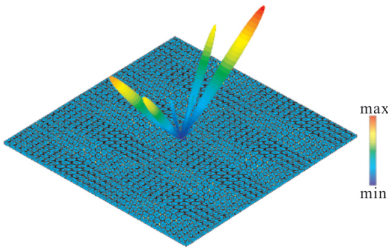


(c) LP波垂直入射的电场散射图

图 11 超表面 1 散射图

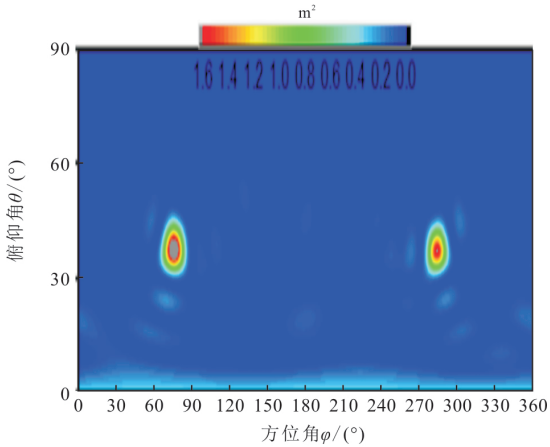
图 10(a)中,LCP 波垂直入射到超表面 1 后,反射产生一个波束,利用式(2)计算得到方位角 $\varphi=0^\circ$ 、俯仰角 $\theta=8.7^\circ$,从图 11(a)可知,所设计的编码超表面 1 达到了预计的波束调控效果。而当入射波为 RCP 波时,由图 10(b)和图 11(b)可知,方位角 φ 从 0° 增大到 180° ,俯仰角 θ 仍为 8.7° ,这是因为 LCP 波在 x 轴方向上具有 $+45^\circ$ 的相位梯度差,而 RCP 波的相位梯度差为 -45° 。LCP 波和 RCP 波在编码超表面 x 轴上具有相反的相位梯度差。图 10(c)中,当 LP 波垂直入射时,反射产生两个对称方向的波束,理论计算方位角 $\varphi=0^\circ$ 或 180° 、俯仰角 $\theta=8.7^\circ$,这是由于 LP 波可以分解为 LCP 波和 RCP 波,图 11(c)的散射图验证了超表面 1 对 LP 波的波束调控效果。

超表面 2 在不同极化波垂直入射下的三维远场和电场散射结果分别如图 12 和图 13 所示。

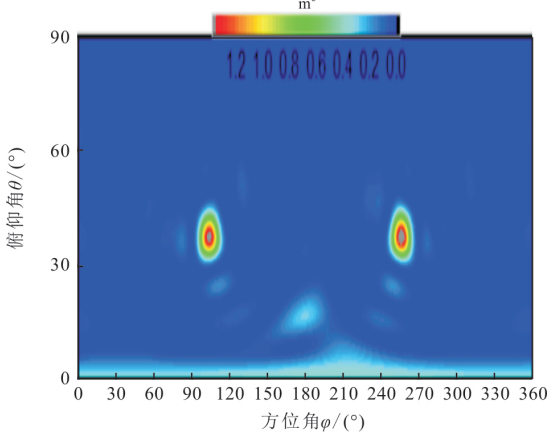


(c) LP波垂直入射时的远场

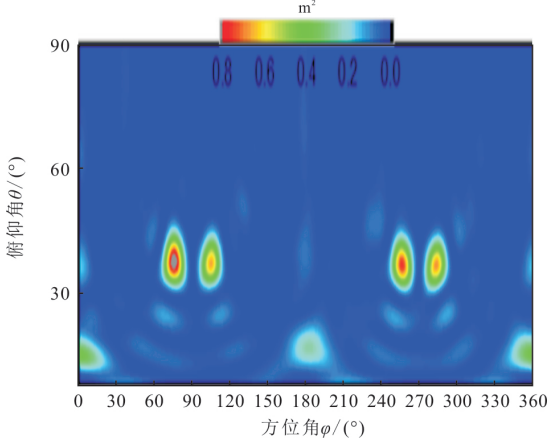
图 12 超表面 2 远场



(a) LCP波垂直入射的电场散射图

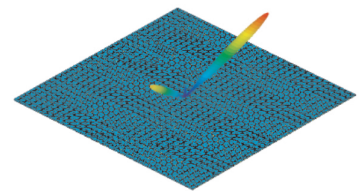


(b) RCP波垂直入射的电场散射图

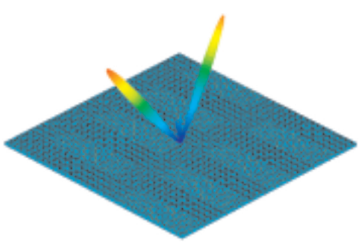


(c) LP波垂直入射的电场散射图

图 13 超表面 2 散射图



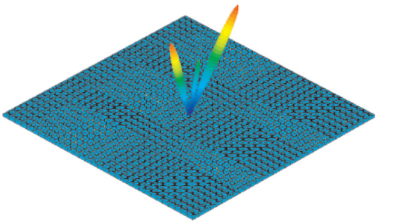
(a) LCP波垂直入射时的远场



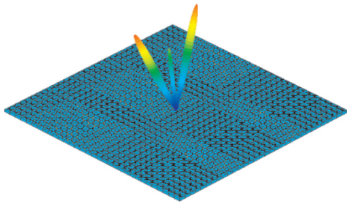
(b) RCP波垂直入射时的远场

图 12(a)图中,反射产生两个方向对称的波束,利用式(2)计算方位角 $\varphi=76^\circ$ 或 284° 、俯仰角 $\theta=37.5^\circ$,和图 13(a)中散射场的结果一致;而当入射波为 RCP 波时,理论计算得到的反射产生的两个对称波束方向的方位角 $\varphi=104^\circ$ 或 256° 、俯仰角 $\theta=37.5^\circ$,同样和散射场结果一致;图 13(c)图是 LP 波垂直入射到超表面 2 的结果,LP 波反射到 4 个对称方向:方位角 $\varphi=76^\circ$ 、 104° 、 256° 或 284° 、俯仰角 $\theta=37.5^\circ$ 。

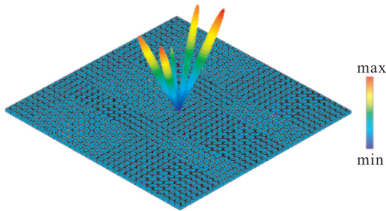
超表面 3 在不同极化波垂直入射下的三维远场和电场散射结果分别如图 14 和图 15 所示。



(a) LCP波垂直入射时的远场

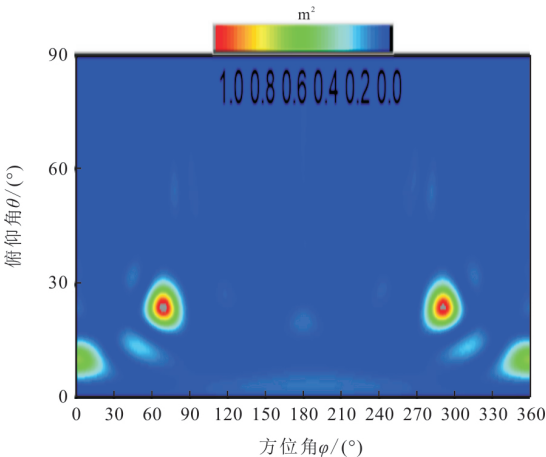


(b) RCP波垂直入射时的远场

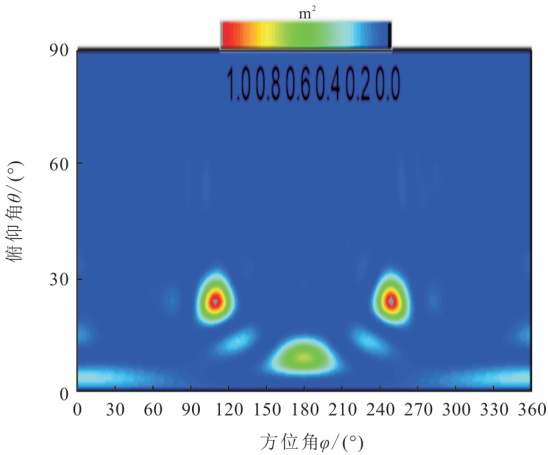


(c) LP波垂直入射时的远场

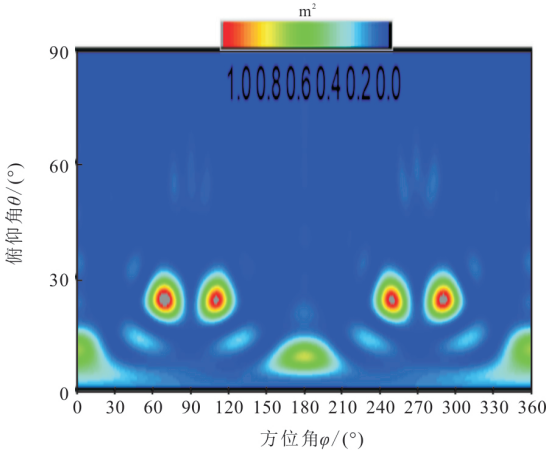
图 14 超表面 3 远场



(a) LCP波垂直入射的电场散射图



(b) RCP波垂直入射的电场散射图



(c) LP波垂直入射的电场散射图

图 15 超表面 3 散射图

图 14(a)中,LCP 波垂直入射后被反射到 3 个角度,理论计算和图 15(a)中散射场的结果一致,方位角和俯仰角分别为 $\varphi=0^\circ$ 和 $\theta=8.7^\circ$ 、 $\varphi=69.4^\circ$ 和 $\theta=23.9^\circ$ 、 $\varphi=290.6^\circ$ 和 $\theta=23.9^\circ$ 。图 15(b)图中,RCP 波垂直入射后也被反射到 3 个角: $\varphi=180^\circ$ 和 $\theta=8.7^\circ$ 、 $\varphi=110.6^\circ$ 和 $\theta=23.9^\circ$ 、 $\varphi=249.4^\circ$ 和 $\theta=23.9^\circ$,和理论结果一致。在 LP 波垂直入射到编码超表面 3 后,产生六束对称方向的放射波,由图 15(c)图可看出,该六束反射波方向即为 LCP 波和 RCP 波入射下反射波的方向。

上述结果证明了 3 bit 编码超表面对波束的调控能力,并且编码超表面对波束的调控不止与编码序列有关,还与入射波极化状态有关。

3.4 编码超表面的雷达散射截面缩减分析

由于随机 PB 相位编码超表面上的相位分布是随机的,可以将入射电磁波的能量定向反射到多个方向,产生大量能量较小的旁瓣,极大地抑制后向散射波。为了验证设计的编码超表面的 RCS 缩减能力,对设计的超表面和相同尺寸的纯金属板在

10~31.5 GHz 的电磁波垂直入射下的 RCS 缩减值进行了对比,如图 16 所示。PB 编码超表面 RCS 缩减远比纯金属板的 RCS 缩减能力强,证明了论文中设计的 PB 相位编码超表面具有良好的 RCS 缩减性能。

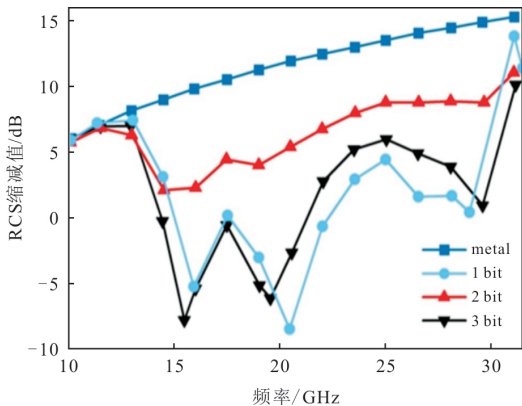


图 16 超表面 RCS 缩减

需要指出的是,波束调控能力与 RCS 缩减效果之间在一定程度上存在权衡关系。当编码序列具有较强的规律性并形成明确的相位梯度时,阵面反射能量更容易向特定方向集中,因此有利于实现较强的波束指向性和可控波束重构;但此时散射能量的定向分布也相对更强,往往不利于后向散射的进一步抑制。相较而言,当阵面采用离散化程度更高或近似随机的相位分布时,反射能量更容易被打散并分配到多个方向,从而有助于降低镜面反射和后向散射水平,表现出更明显的 RCS 缩减特性,但单一方向上的能量集中能力会有所下降。由此可见,波束赋形与散射抑制分别对应不同的编码设计侧重点,前者强调反射能量的定向调控,后者强调散射能量的空间分散。本文中周期性编码阵列主要用于验证所提结构的波束调控能力,而 RCS 结果则进一步说明该结构在散射抑制方面具有良好的应用潜力。

从通感一体化应用角度看,所设计的宽频 PB 相位编码超表面在通信与感知两个层面均具有潜在应用价值。对于通信功能,周期性编码序列形成的定向反射及多波束辐射可用于反射链路增强、用户定向覆盖以及空间复用等场景;对于感知功能,阵列对散射方向及后向散射强度的调控能力可用于探测回波控制、杂波抑制及低可探测散射管理。相应地,本文采用的极化转换率指标主要表征结构在宽频范围内的极化调控效率,远场方向图反映了阵列的波束赋形与空间能量重构能力,RCS 则用于

评价其对散射回波分布及后向散射水平的调控效果。因此,所提的结构不仅能够实现宽频极化转换,还具备面向通感一体化应用的波束控制与散射调制潜力。

4 结语

设计了一种 M 型编码超表面反射型基本单元,并且基于 PB 相位理论,通过基本单元顶层金属板的旋转调整基本单元相位差,旋转角 α 从 $0^\circ \sim 157.5^\circ$,步宽为 22.5° ,构成了 8 个编码基本单元,在 14.74~30.24 GHz 频率范围内,设计的基本单元 PCR 在 90% 以上,相对带宽超过 65%,具有高极化转化、宽频带的特性。设定 4×4 基本单元作为编码粒子,设计了 3 种不同的 3 bit 编码超表面,并验证了超表面的波束调控作用。论文将设计的编码超表面应用到 RCS 缩减中,与裸金属平面 RCS 缩减量进行了对比,超表面 RCS 最大缩减量接近 20 dB,证明了其 RCS 缩减效果,所提出的结构可进一步应用于波束调控和空间波的极化中。

参 考 文 献

- [1] Liu W H, Jiao W G, Zhang X, et al. Joint beamforming and reflection design for maximizing energy efficiency of RIS-assisted ISAC systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 2297-2311.
 - [2] Chen X Q, Zhang L, Zheng Y N, et al. Integrated sensing and communication based on space-time-coding metasurfaces [J]. Nature Communications, 2025, 16: 1836.
 - [3] Yang H Q, Dai J Y, Li H D, et al. Adaptively programmable metasurface for intelligent wireless communications in complex environments[J]. Nature Communications, 2025, 16: 6070.
 - [4] Feng R, Ratni B, Yi J J, et al. Versatile metasurface platform for electromagnetic wave tailoring[J]. Photonics Research, 2021, 9(9): 1650.
 - [5] 吕淑媛, 孟飞, 罗文峰, 等. 基于相变材料 GST 与孔径共享宽带宽消色差透镜的设计[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(6): 1229-1234.
- Lyu Shuyuan, Meng Fei, Luo Wenfeng, et al. Design of a wide bandwidth achromatic metalens based on phase change material GST with aperture sharing[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(6): 1229-1234.

[6] 徐红欣,陈艳蕊,周永金,等. 动态调控电磁隐身表面[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 849-857.
Xu Hongxin, Chen Yanrui, Zhou Yongjin, et al. Dynamically tunable electromagnetic stealth surface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36 (6): 849-857.

[7] 郝丽梅,杨宵,闫小乐,等. 多频带声学超构材料的透射性能[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(3): 631-636.
Hao Limei, Yang Xiao, Yan Xiaole, et al. Transmission property of multi-band acoustic metamaterials[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(3): 631-636.

[8] Xu H X, Wang C H, Hu G W, et al. Spin-encoded wavelength-direction multitasking Janus metasurfaces [J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9 (11): 2100190.

[9] Wu T, Zhang X Q, Xu Q, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase, amplitude, and polarization[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10: 2101223.

[10] Li G Q, Shi H Y, Liu K, et al. Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70 (18): 188701.

[11] Zhang N, Zhao J M, Chen K, et al. Independent dual-beam control based on programmable coding metasurface[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(17): 178102.

[12] Jin M H, Wang Y X, Chai M Q, et al. Terahertz detectors based on carbon nanomaterials[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(11): 2107499.

[13] 李勇峰,张介秋,屈绍波,等. 宽频带雷达散射截面缩减相位梯度超表面的设计及实验验证[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 084103.
Li Yongfeng, Zhang Jieqiu, Qu Shaobo, et al. Design and experimental verification of a two-dimensional phase gradient metasurface used for radar cross section reduction [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63 (8): 084103.

[14] 张威虎,李晓,田丰,等. 一种超介质液体浓度传感器的设计[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(3): 498-505.
Zhang Weihu, Li Xiao, Tian Feng, et al. Design of a metamaterial liquid concentration sensor[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41 (3): 498-505.

[15] 柴鑫悦,胡浩,胡晓雪,等. 太赫兹低频段粗糙目标的表面散射及成像特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(10): 1011009.
Chai Xinyue, Hu Hao, Hu Xiaoxue, et al. Surface scattering and imaging characteristics of rough targets in low-frequency terahertz band[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(10): 1011009.

[16] 黄成成,张永刚,梁兰菊,等. 窄/宽带可切换的石墨烯-二氧化钒复合结构太赫兹吸波器[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1916001.
Huang Chengcheng, Zhang Yonggang, Liang Lanju, et al. Narrow/broad band switchable terahertz absorber based on graphene and vanadium dioxide composite structure [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42 (19): 1916001.

[17] 董妮娅,张伟男,林峰,等. 基于优化算法的 2-bit 编码超表面缩减 RCS 研究[J]. 压电与声光, 2023, 45 (5): 791-794.
Dong Niya, Zhang Weinan, Lin Feng, et al. Research on RCS reduction of 2-bit coding metasurface based on optimization algorithm[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(5): 791-794.

[18] 汪静丽,尹亮,董先超,等. 基于编码相位梯度超表面实现太赫兹雷达散射截面缩减[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1124001.
Wang Jingli, Yin Liang, Dong Xianchao, et al. Radar cross section reduction based on coding phase gradient metasurface in terahertz frequencies[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1124001.

[19] Fei P, Vandenbosch G A E, Guo W H, et al. Versatile cross-polarization conversion chiral metasurface for linear and circular polarizations[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(13): 2000194.

[20] 罗文峰,李新慧,吕淑媛,等. 双波长偏振控制超表面透镜的设计[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 215-221.
Luo Wenfeng, Li Xinhui, Lyu Shuyuan, et al. Design of dual-wavelength polarization control metasurface lens[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 215-221.

[21] 董玉莹,郝建军,牟永飞. 埋地式无线传感器的磁感应通信天线模型[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39 (3): 522-528.
Dong Yuying, Hao Jianjun, Mou Yongfei. Magnetic induction antenna model for buried wireless sensor[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(3): 522-528.

[22] Yang H H, Li T, Jidi L, et al. From metasurface to low-RCS array antenna: A fast and efficient route to design stealthy array antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71 (5): 4075-4084.

[23] Zhang L, Liu S, Li L L, et al. Spin-controlled multiple pencil beams and vortex beams with different polarizations generated by pancharatnam-berry coding metasurfaces[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(41): 36447-36455.

[24] Chen K, Feng Y J, Yang Z J, et al. Geometric phase coded metasurface: From polarization dependent directive electromagnetic wave scattering to diffusion-like scattering[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35968.

[25] Ding X M, Guan C S, Wang Z C, et al. Metasurface for bending the reflected wave under oblique incidence [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(11): 7502804.

[26] Li J S, Yao J Q. Manipulation of terahertz wave using coding pancharatnam-berry phase metasurface [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1-12.

[27] Ding G W, Chen K, Luo X Y, et al. Direct routing of intensity-editable multi-beams by dual geometric phase interference in metasurface[J]. Nanophotonics, 2020, 9(9): 2977-2987.

[28] Gou Y, Ma H F, Wu L W, et al. Broadband spin-selective wavefront manipulations based on Pancharatnam-Berry coding metasurfaces [J]. ACS Omega, 2021, 6(44): 30019-30026.

[作者简介]



陈国强(1975—),男,陕西西安人,延安车村煤业(集团)有限责任公司总经理,主要研究方向为煤矿开采。E-mail: 1029360986@qq.com



贺延军(1968—),男,陕西延安人,富县矿业开发有限公司芦村二号煤矿分公司高级工程师,主要研究方向为矿山通信技术及煤矿安全。E-mail: 2358751522@qq.com



李胜(1983—),男,陕西延安人,延安市富县矿业开发有限公司芦村二号煤矿分公司技术员,主要研究方向为采矿工程。E-mail:2068727454@qq.com



赵强(1990—),男,陕西黄陵人,富县矿业开发有限公司芦村二号煤矿分公司助理工程师,主要研究方向为矿山地质。E-mail:2296419340@qq.com



李新民(1977—),男,陕西宝鸡人,博士,西安科技大学讲师,主要研究方向为宽带无线通信技术。E-mail: xinmin-lee@163.com。



李培煊(1983—),女,陕西西安人,博士,西安科技大学高级工程师,主要研究方向为矿山通信技术及煤矿安全。E-mail:1685130200@qq.com



黄晓俊(1983—),男,新疆伊犁人,博士,西安科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为新一代矿山通信技术、矿山电磁安全、电磁新材料与微波/射频器件等。E-mail:hxj@xust.edu.cn



陈睿博(2001—),男,陕西咸阳人,西安科技大学硕士研究生,主要研究方向为共口径天线、无线通信等。E-mail: chenruibo311@yeah.net

[责任编辑:蔡秀梅]