

可重构超构表面实现 L 波段波束动态调控及信息调制*

许一帆¹⁾ 邓烨¹⁾ 佟琬婷¹⁾ 王海峰²⁾³⁾ 王学运²⁾³⁾
赵俊明¹⁾ 姜田¹⁾ 张升康^{2)3)†} 陈克^{1)‡} 冯一军¹⁾

1) (南京大学电子科学与工程学院, 南京 210023)

2) (北京无线电计量测试研究所, 北京 100854)

3) (计量与校准技术重点实验室, 北京 100854)

(2024 年 11 月 30 日收到; 2025 年 3 月 15 日收到修改稿)

本文提出一种工作在 L 波段的宽带可重构转极化超构表面设计方法, 并实现了二进制幅移键控 (binary amplitude shift keying, BASK) 和二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 两种调制方式的超构表面信息直接调制. 通过控制超构表面单元结构上的开关二极管通断状态, 可在 1.17—1.66 GHz 频段改变单元的转极化反射幅值和相位, 并通过对其幅相分布特性的实时编码实现波束调控与信息调制. 在此基础上, 构建了基于 BASK 和 BPSK 两种调制方式的超构表面新型无线通信系统, 实现了对数字信息的实时调制与传输. 本文提出的超构表面及其设计方法有望在信息传输、卫星通信等应用中发挥作用.

关键词: 可重构超构表面, L 波段, 幅度调制, 相位调制**PACS:** 81.05.Xj, 07.05.Tp, 03.65.Vf, 84.40.Ua**DOI:** 10.7498/aps.74.20241668**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241668

1 引言

超构表面作为一种亚波长二维人工结构, 相比传统三维超构材料, 具有低损耗、低剖面、易集成等优势. 通过设计超构表面的单元结构及其空间序构方式, 可实现对电磁波幅度、相位、极化、波阵面的灵活调控^[1-4]. 随着超构表面发展, 许多新奇物理现象与器件应运而生, 如隐身斗篷^[5,6]、平面透镜^[7]、全息成像^[8,9]以及其他各种新型功能器件^[10-12].

通过在超构表面中引入可调控材料或元器件, 如石墨烯、相变材料和电控二极管/变容管^[13-16]等, 可以利用外部激励源动态控制超构表面的电磁响应, 实现其电磁功能的可重构. 由此, 超构表面

转变为能动态调控电磁波的可重构超构表面. 在此基础上, 可进一步利用单片机控制电路或现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 控制超构表面工作状态, 通过数字硬件系统精准控制高电平和低电平信号的实时输出, 动态重构超构表面空间相位分布特性, 进而实现电磁波近远场特性的实时可编程^[17]. 这类可编程超构表面提出了一种将超构表面与数字系统相结合的方法, 打破了无源结构中电磁功能固定的限制, 实现了更加灵活多变的电磁调控, 如动态微波成像^[18]、可调谐波束赋形^[19]和信号覆盖增强等^[20-22]. 此外, 将超构表面实时调控电磁波与信息传输相结合, 利用幅度、相位等电磁波各项特性变化映射成数字信息, 可形成新型超构表面无线通信系统^[23-26]. 与传统方式

* 计量与校准技术重点实验室基金 (批准号: 2023-JCJQ-LB-017) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangsk@126.com

‡ 通信作者. E-mail: ke.chen@nju.edu.cn

相比,可重构超构表面信息直调与传输直接利用基带信号调制载波相位、幅度或频率等,因此有望简化无线通信系统.但是,目前大部分具备信息调制功能的可重构超构表面均集中于微波高频段,对处于较低频段(如L波段)的研究较少,而这些频段也有重要应用价值,例如卫星通信、数字广播、定位导航等.

本文提出了一种工作于L波段的1 bit 宽带相位可重构电磁超构表面,实现了对波束的动态调控.在此基础上,利用FPGA系统输出动态电压调制超构表面反射响应,构建了基于该超构表面的新型无线通信系统,实现了二进制幅移键控(binary amplitude shift keying, BASK)和二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)两种调制方式.

2 单元结构与仿真分析

所设计的1 bit 相位可重构超构表面的单元结构如图1所示,由两层刻蚀金属图案的介质基板构成,且上下介质层中心由金属细柱连接.其中,介质基板采用介电常数为2.2,损耗角正切为0.001的F4B材料,金属结构均由铜构成.超构表面单元周期 $p = 44 \text{ mm}$, $h_1 = 1.5 \text{ mm}$, $h_2 = 40 \text{ mm}$.单元上层表面金属图案为关于 x 和 y 轴对称的正交交叉结构,十字臂上缺口处加载偏置电压调节通断的PIN二极管.

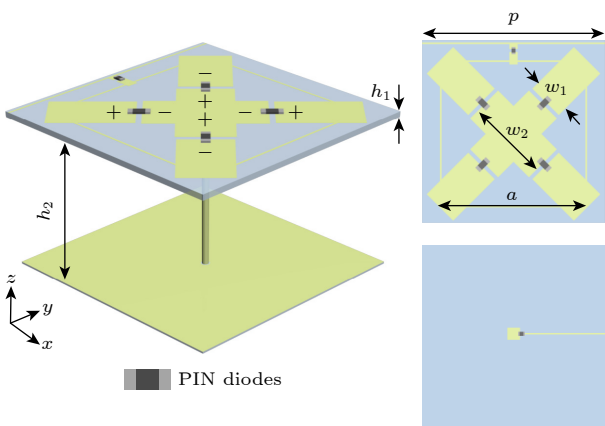


图1 单元结构示意图

Fig. 1. Schematic of the metasurface element.

该超构表面主要通过构造具有镜像对称关系的两种转极化结构来实现 180° 相位差^[27].线极化转换单元结构通常是关于结构对角线(x 和 y 轴之

间的 $\pm 45^\circ$ 方向)对称,由结构在 x 和 y 方向上的不对称性,激发出交叉极化模式,从而实现高效转极化功能.根据这一原理,利用对角线上的两组PIN管构造出两种超构表面工作状态:当同一对角线上(如 45° 方向)两个PIN管导通时,则另一对角线上两个PIN管断开(-45° 方向).为实现这样的切换功能,将 45° 对角线的PIN管的工作状态调成一致,而负 45° 的PIN管放置方向相反,因此其导通状态也相反,如图1左图所示.该结构的中心通过金属细柱连接单元背面的金属馈线(图1右下),作为加载外加偏压的一个电极.同时,4个PIN管的另一端通过表面的金属馈线连接,经过 $2 \text{ k}\Omega$ 电阻的隔离作用后,作为另一个电极.由此,该结构在不同通断状态下能够形成分别沿 $+45^\circ$ 和 -45° 两个方向的镜像对称十字,以激发交叉极化模式实现宽带线极化转换,且由电场图2可以看出,两种状态下,单元结构的场分布镜像对称,因此对应的交叉极化分量的反射相位相差 180° .

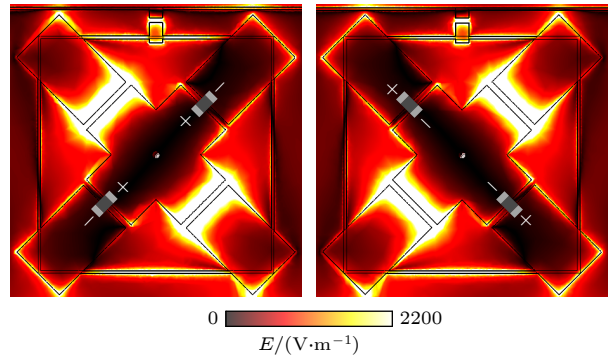


图2 两种工作状态下对应的单元电场分布,其中“+”和“-”分别代表导通二极管的正负极

Fig. 2. Electric field distributions of the metasurface element with two different working states, the “+” and “-” note the positive and negative terminals of the conducting diodes.

采用CST Microwave Studio软件对该单元进行全波电磁仿真分析,单元参数经优化后,其余各项尺寸参数为: $a = 35 \text{ mm}$, $w_1 = 9 \text{ mm}$, $w_2 = 20 \text{ mm}$.当 45° 对角线上PIN二极管工作状态为“ON”时,定义超构表面对应工作状态为 P_0 ,而当 -45° 对角线上PIN二极管工作状态为“ON”时,定义状态为 P_1 .这两种状态下的交叉极化幅度和相位随频率的变化曲线分别见图3(a), (b).该单元结构在两种工作状态下均可以在 $1.17\text{--}1.66 \text{ GHz}$ 范围实现损耗小于 3 dB 的极化转换,且两个状态下的反射幅度相等,反射相位差为 180° .此时,超构

表面单元可工作于相位可重构模式。

此外, 仅控制其中任一条对角线上 PIN 二极管的通断状态时, 单元可在同极化反射和转极化反射进行切换, 因此在两个极化上均能实现幅度调控. 令 45° 对角线上 PIN 的工作状态为“ON”和“OFF”时, 对应超构表面的工作状态为 A_0 和 A_1 , 其单元结构的转极化反射幅度响应曲线如图 4(a) 所示. 该单元结构的相位曲线如图 4(b) 所示, 由于在 A_1 状态下, 其转极化分量幅度均小于 -50 dB, 因此该状态下的相位响应实际意义较小. 此时, 超构表面单元可工作于幅度可重构模式。

3 可重构超构表面编码调制

假设可重构编码超构表面的反射系数为 $\Gamma(t)$, 并可表示为

$$\Gamma(t) = A(t) \cdot \exp\left\{j \left[2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau + \varphi(t) \right] \right\}, \quad (1)$$

其中, $A(t)$, $f(t)$, $\varphi(t)$ 分别表示反射系数 $\Gamma(t)$ 的

幅度、频率和相位, 其值随时间变化的函数. 当入射波的频率为 f_c 时, 其经过超构表面的反射波可写为

$$E_r(t) = \Gamma(t) E_i(t) = A(t) \cdot \exp\left\{j \left[2\pi \left(f_c t + \int_0^t f(\tau) d\tau \right) + \varphi(t) \right] \right\}. \quad (2)$$

根据通信原理, (2) 式中的入射波 $E_i(t)$ 即为载波, 通过调控反射系数能够控制载波的幅度、频率以及相位, 进而实现幅度调制、频率调制和相位调制. 入射载波经过超构表面的调制后能够直接反射到自由空间中, 无需再通过额外的天线辐射. 为了构建电磁波反射系数与传输数字码元之间的映射关系, 需要将 (2) 式中的反射系数进行离散化. 因此, 携带传输信息的编码超构表面的反射系数可以表示为

$$\Gamma(t) = \Gamma_m(t) \cdot g(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad \Gamma_m(t) \in M, \quad (3)$$

其中, $\Gamma_m(t)$ 是信息码元映射成的复反射系数, $g(t)$ 为基本脉冲成形函数, T 为码元周期, M 则是

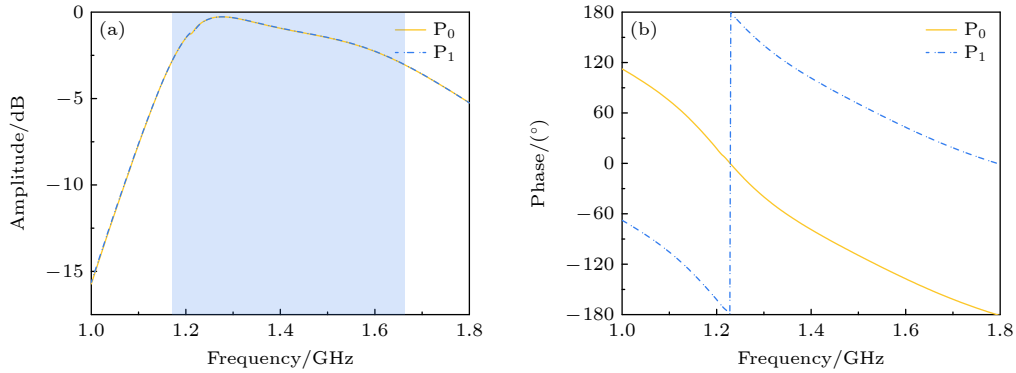


图 3 相位可重构模式下, 超构表面单元的幅度和相位响应 (a) P_0 和 P_1 状态的幅度响应; (b) P_0 和 P_1 状态的相位响应

Fig. 3. Amplitude and phase responses of the element operating at phase-reconfigurable mode: (a) Amplitude response of states P_0 and P_1 ; (b) phase response of states P_0 and P_1 .

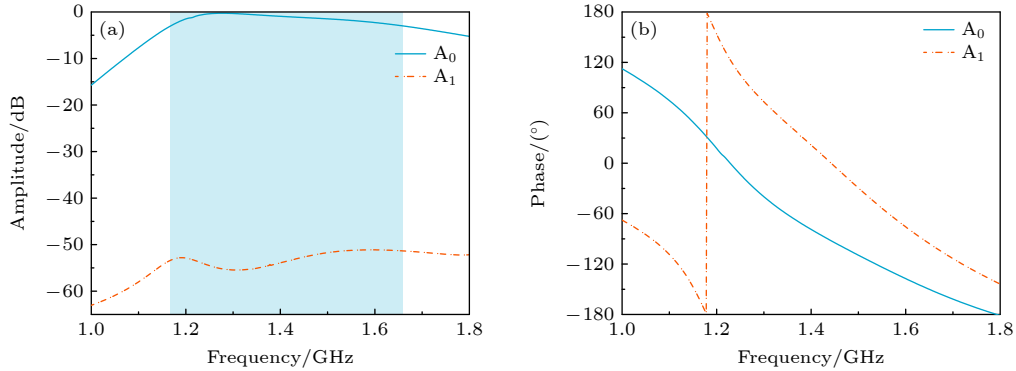


图 4 幅度可重构模式下, 超构表面单元的幅度和相位响应 (a) A_0 和 A_1 状态的幅度响应; (b) A_0 和 A_1 状态的相位响应

Fig. 4. Amplitude and phase responses of the element operating at amplitude-reconfigurable mode: (a) Amplitude response of states A_0 and A_1 ; (b) phase response of states A_0 and A_1 .

一组星座点, 其基数为 $\text{card}(M)$. 每个消息符号的 $\Gamma_m(t)$ 被映射为一个 $\log_2 \text{card}(M)$ 位数字信息. 在一个 n bit 调制方案中 (n 为整数, 且 $n \geq 1$), $\text{card}(M)$ 等于 2^n . 不同调制方式下, 超构表面需要根据作为调制信号的时间序列中的码元变化, 将其映射为反射波中电磁特性的变化. 在 1 bit 相位调制方案中, 超构表面将数字码元的变化转化为反射系数的相位变化, 即

$$\Gamma_m(t) = A_0 \cdot e^{j(2\pi f_c t + \varphi_m)}, \quad \varphi_m \in M = \{\varphi_0, \varphi_1\}, \quad (4)$$

其中, φ_0 和 φ_1 分别为 0 bit 和 1 bit 的相位映射. 在 1 bit 幅度调制方案中, 超构表面将数字码元的变化转化为反射系数的幅度变化, 即

$$\Gamma_m(t) = A_m \cdot e^{j(2\pi f_c t + \varphi_0)}, \quad A_m \in M = \{A_0, A_1\}, \quad (5)$$

其中, A_0 和 A_1 分别为 0 bit 和 1 bit 的幅度映射.

4 超构表面波束调控仿真分析

我们进一步利用单元结构形成了 10×10 的超

构表面, 并进行波束调控的仿真分析. 转极化散射方向图如图 5 所示, 根据广义斯涅尔定律^[12], 采用不同的编码相位分布, 即可实现不同角度的波束偏转:

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\varphi}{dx}, \quad (6)$$

式中, θ_r 和 θ_i 分别为入射角和反射角, λ_0 为自由空间波长, n_i 为入射波介质折射率, $d\varphi/dx$ 为沿目标方向上的相位变化. 编码相位图案中的不同颜色分别代表单元的“0”和“1”两种编码状态. 在平面波入射条件下, 当每列的单元相位一致, 且编码相位关于中心对称或互补, 可使反射波为对称双波束. 图 5(a), (b) 中为双波束的仿真分析与实验测试结果, 其主波束方向分别为 $\pm 20.5^\circ$ 和 $\pm 28.4^\circ$, 在后续的实验过程中, 也将利用此编码相位, 进行信息调制. 采用棋盘格式的空间相位分布, 可进一步实现如图 5(c) 的四波束, 此时波束位于方位角 (xoy 平面内与 x 正半轴夹角) 为 $\varphi = \pm 45^\circ$ 的平面内, 主波

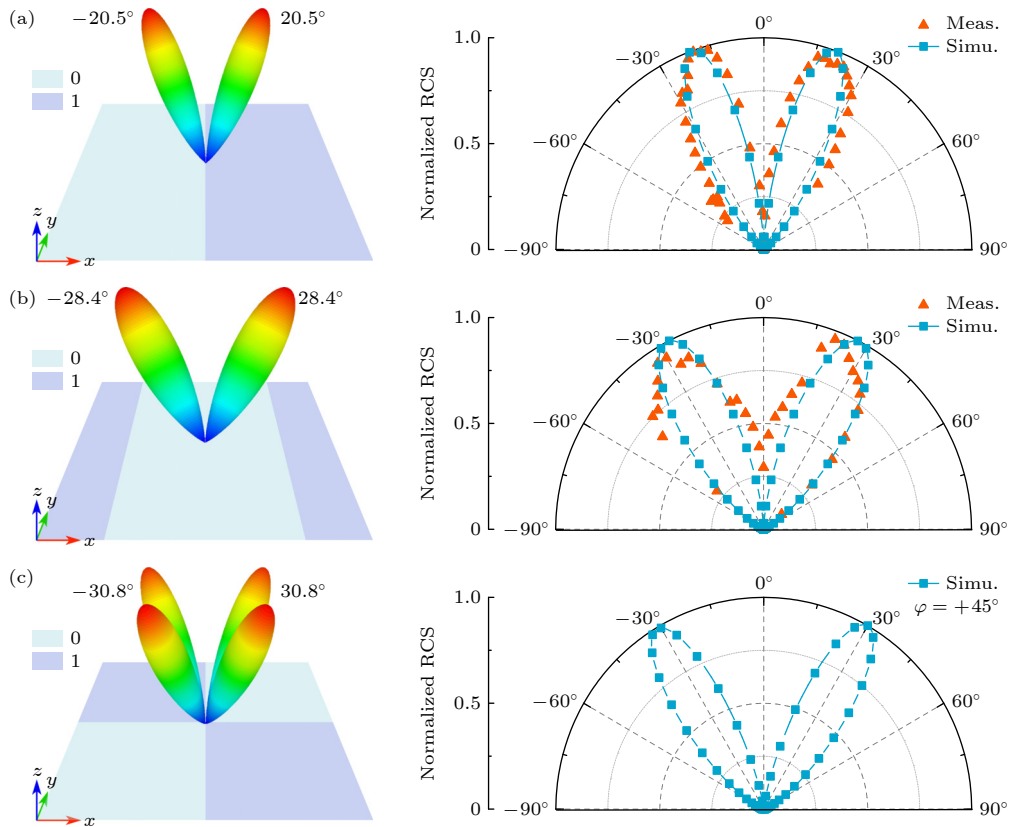


图 5 波束调控仿真分析结果图, 左侧图为相位编码及其三维散射方向图, 右侧图为波束切面的二维方向图 (a) 20.5° 对称双波束; (b) 28.4° 对称双波束; (c) 30.8° 对称四波束

Fig. 5. Simulation results of the beams control, left panels show the phase coding pattern on the metasurface and the 3D scattering pattern, while the right panels show the 2D scattering pattern of the beam: (a) Twin-beam with titling angle of 20.5° ; (b) twin-beam with titling angle of 28.4° ; (c) four beams with titling angle 30.8° .

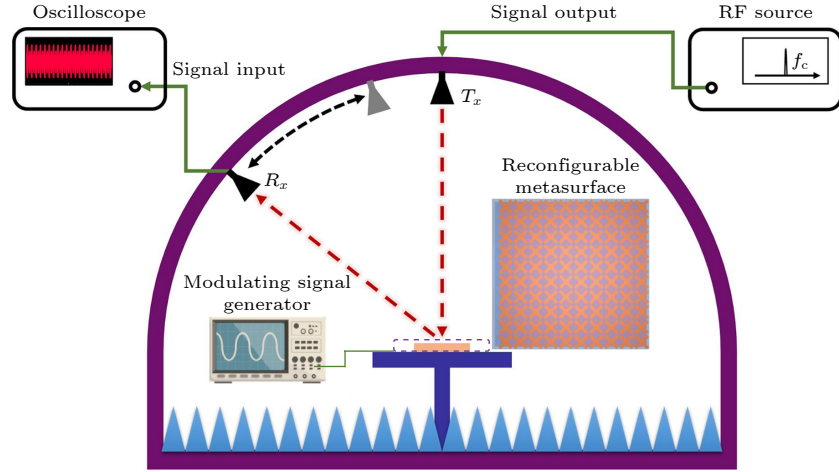


图 6 实验测试示意图

Fig. 6. Schematic of the experiment set-up.

束的方向均为 $\pm 30.8^\circ$. 当波束的散射角度较大时 (如 60°), 转极化的主波束幅值减小而同极化增大. 可通过减小超构表面单元尺寸、改善其斜入射性能来提升大角度的波束性能.

5 信息调制实验测试与分析

首先, 在弓形架系统下测试了超构表面的基本动态调制速率, 如图 6 和图 7 所示. 收发天线均安装在弓形滑轨上, 地面放置了吸波材料, 用于减少环境的杂散波, 是较为理想的测试环境. 射频信号发生器输出正弦波信号, 作为载波信号, 经由发射端喇叭天线辐射并照射至超构表面. 与此同时, 可重构超构表面依据调制信号发生器所输出的电压信号, 动态地调整其编码相位分布, 进而将调制信号加载至入射的载波上, 并将已调制的信号反射至接收端的天线. 在信号接收端, 弓形架系统可改变接收端天线位置, 以便接收来自不同角度的反射波. 同时, 接收天线与射频高速示波器相连, 使得

已调信号能够直接被捕获和分析. 调制信号发生器 (Rigol DG992) 输出占空比 (高电平占空比) 为 50% 的方波信号, 高、低电平分别为 1 V, 0 V 时, 对应于超构表面 A_0 , A_1 工作状态, 超构表面进行 BASK 调制; 当高、低电平分别为 1 V, -1 V 时, 对应于超构表面 P_0 , P_1 工作状态, 超构表面进行 BPSK 调制. 实验采用射频高速示波器的采样频率为 80 GHz, 远大于接收信号最大频率, 满足奈奎斯特采样条件.

图 8(a), (b) 为 1.3 GHz 入射波情况下, BASK 调制方式下的已调信号和对信号解调后得到的基带信号. 此时, 超构表面所有单元均工作于同一状态, 镜面反射入射波的同时对其调制信号. 可以观察, 在 $5 \mu\text{s}$ 时间内已调信号有多个包络变化 (0.5 MHz 对应 2.5 个包络变化, 2 MHz 对应 10 个包络变化), 这是由于超构表面在加载调制信号后, 使反射波在高反射和低反射状态下快速切换. 解调后得到方波基带信号, 其变化规律也与其对应的调制速率相符. 图 8(c), (d) 为 BPSK 调制下相应的信号波形图, 采用了图 5(a) 的编码相位分布, 实现 28.4° 波束偏折. BPSK 调制方式下无法直接从已调信号观察相位变化, 但解调方波信号的幅值在 ± 1 跳变, 表明信号在正反相之间切换, 验证了采用 BPSK 调制的可行性. 测试结果表明, 在 0.5—2 MHz 的调制速率下, 经过两种方式调制的信号均能在解调后还原信号, 也验证了超构表面能实现波束调控和信息调制的同步进行, 但随着调制速率的增大, 接收信号会发生些许畸变, 可以通过采用高性能的二极管和提升馈电系统来改善这一情况.

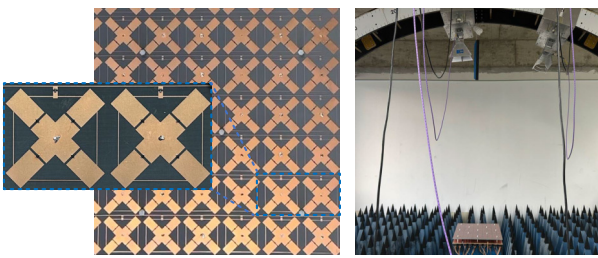


图 7 超构表面样品与弓形架测试系统

Fig. 7. Prototype of metasurface and the arched measurement system.

为测试超构表面在两种调制方式下的信息传输能力,我们在真实环境下搭建了超构表面无线通

信系统. 该系统工作原理及现场测试图如图 9 所示,由超构表面、收发天线、射频信号源、FPGA、

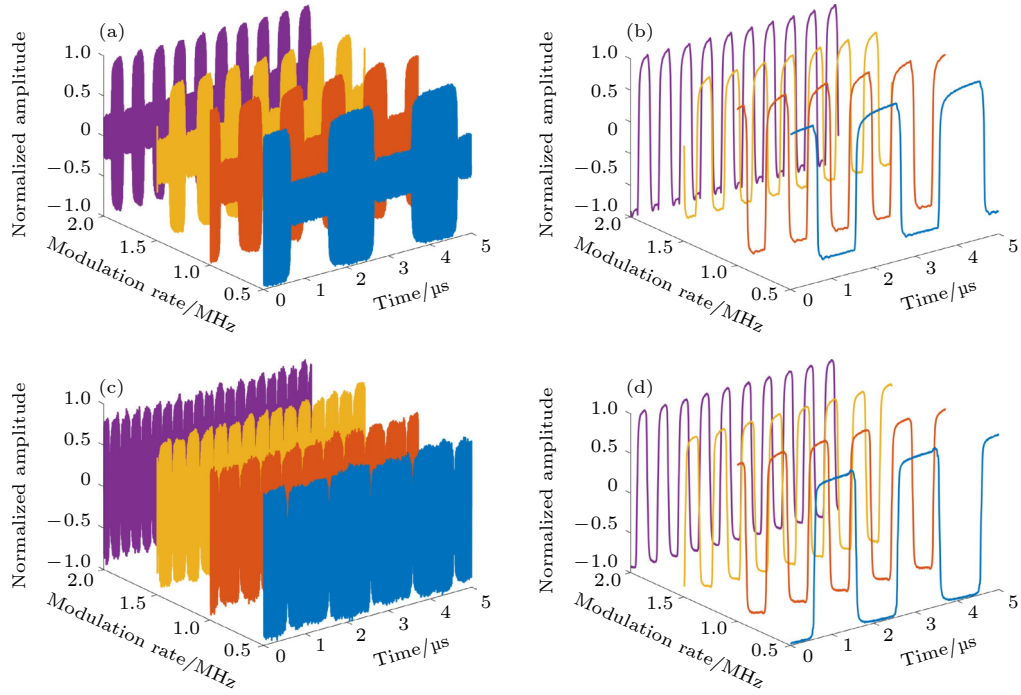


图 8 BASK 调制下对应的 (a) 已调信号和 (b) 解调信号; 28.4° 偏转角度下 BPSK 调制对应的 (c) 已调信号和 (d) 解调信号
Fig. 8. (a) Modulated signal and (b) demodulated signal of BASK; (c) modulated signal and (d) demodulated signal of BPSK at 28.4° receiving angle.

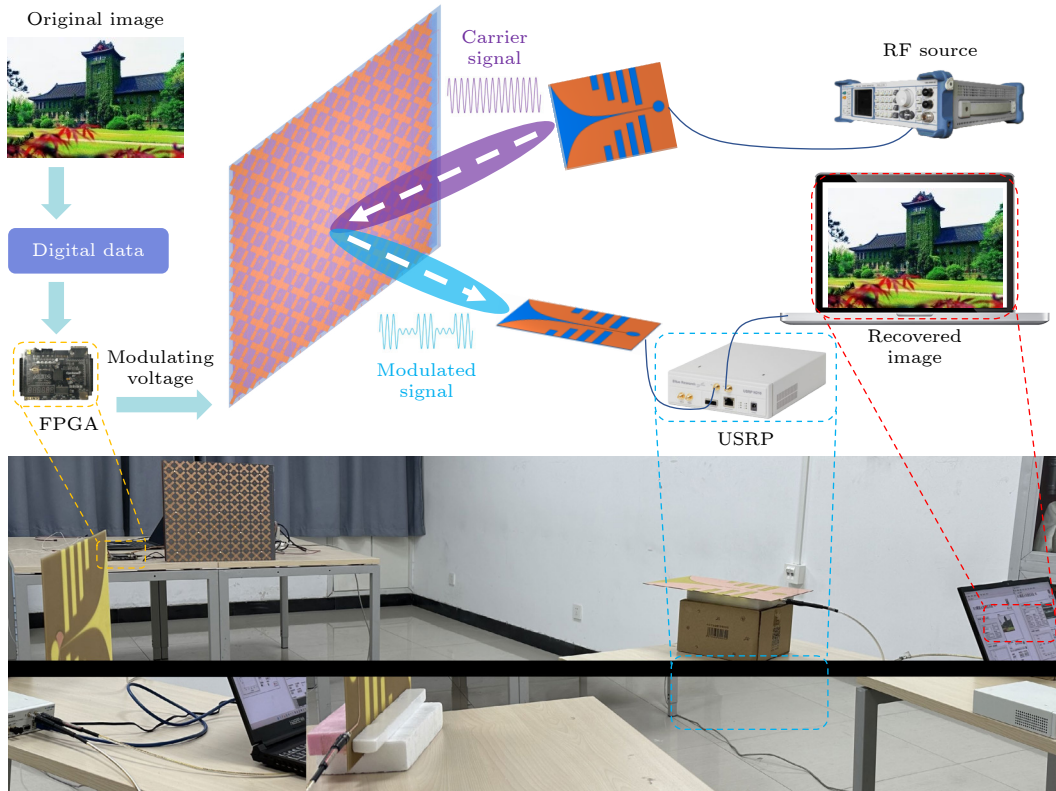


图 9 超构表面无线通信示意图及现场测试图

Fig. 9. Schematic of metasurface wireless communication and the measurement environment.

通用软件无线点外设 (universal software radio peripheral, USRP) 及终端设备组成. 测试过程中, 将一张大小 220×150 像素的图片以 0 bit 和 1 bit 序列的形式表示, 并将其对应为超构表面的工作状态序列用于传输信息. 随后, 利用 FPGA 根据超构表面工作状态序列, 实时输出高低电平调制照射至超构表面的载波信号. 载波信号经过超构表面的调制与反射, 转为已调信号被天线接收, 由 USRP 完成信号的解调并传输至终端设备完成图片的还原.

两种调制方式下, 收发天线与超构表面的距离均为 2.4 m, 调制信号码元速率为 1 Mbps ($1 \text{ Mbps} = 0.125 \text{ MB/s}$). 观察两种调制方式的接收星座图, 图 10(a) 中解调得到的基带信号对应星座点主要分布在坐标轴上原点和同相分量为 1 处附近, 分别代表“0”, “1”码元信号, 符合 BASK 调制下星座点的分布规律, 说明接收信号中不同码元在幅度上的差异较大. 图 10(b) 中解调得到的基带信号对应星座点主要分布在坐标轴上同相分量为 ± 1 处附近, 分别代表“0”, “1”码元信号, 符合 BPSK 调制下星座点的分布规律, 说明接收信号中不同码元在相位

上的差异较大. 两种调制方式中, 不同码元信号在星座图上分布的距离较远, 星座点分布较为紧密, 表明系统具备抗噪能力, 在降低误码率的同时, 也保证了一定的通信质量. 对比还原图片 (图 10 插图) 和原图, 可以发现两种调制方式下的信号都得到了较好还原. 由于在传输信道中存在噪声, 会使得解调后信号的幅相存在偏差, 因此还原后的图片上存在少许噪点. 为减少接收端信号的幅相误差, 可增大发射功率, 从而提升信噪比; 也可引入信道编码, 如卷积码、低密度奇偶校验 (low-density parity-check, LDPC) 码等^[28,29], 提升系统纠错能力, 进而增加信息传输的可靠性.

6 结 论

本文基于 PIN 二极管电可调的方式设计了一种 L 波段的可重构超构表面, 并将其应用于超构表面信息直接调制中. 具体地, 该超构表面利用单元的结构特征, 根据二极管组合的工作状态, 可动态切换其转极化分量的反射相位和反射幅度, 实现 1 bit 相位或幅度的动态可调. 由此, 实现了 L 波段的动态多波束调控. 在此基础上, 利用超构表面实现了 L 波段的 BASK 和 BPSK 两种调制方式的信息直接调制, 且信息传输效果较好. 该超构表面有望拓宽可重构超构表面的应用范围, 也有望为超构表面在卫星通信、保密通信等领域的应用提供支持.

参考文献

- [1] Luo X G 2019 *Adv. Mater.* **31** 1804680
- [2] Liu L X, Zhang X Q, Kenney M, Su X Q, Xu N N, Ouyang C M, Shi Y L, Han J G, Zhang W L, Zhuang S 2014 *Adv. Mater.* **26** 5031
- [3] Zhang X H, Pu M B, Guo Y H, Jin J J, Li X, Ma X L, Luo J, Wang C T, Luo X G 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1809145
- [4] Guo Y H, Ma X L, Pu M B, Li X, Zhao Z Y, Luo X G 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800592
- [5] Yang J N, Huang C, Wu X Y, Sun B, Luo X G 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800073
- [6] Ni X J, Wong Z J, Mrejen M, Wang Y, Zhang X 2015 *Science* **349** 1310
- [7] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [8] Chen K, Ding G W, Hu G W, Jin Z W, Zhao J M, Feng Y J, Jiang T, Alu A, Qiu C W, 2020 *Adv. Mater.* **32** 1906352
- [9] Li J T, Wang G C, Yue Z, Liu J Y, Li J, Zheng C L, Zhang Y T, Zhang Y, Yao J Q 2022 *Opto-Electron. Adv.* **5** 210062-1
- [10] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, Shi Z J, Chen W T, Capasso F 2019 *Science* **365** eaax1839
- [11] Monticone F, Estakhri N M, Alu A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110**

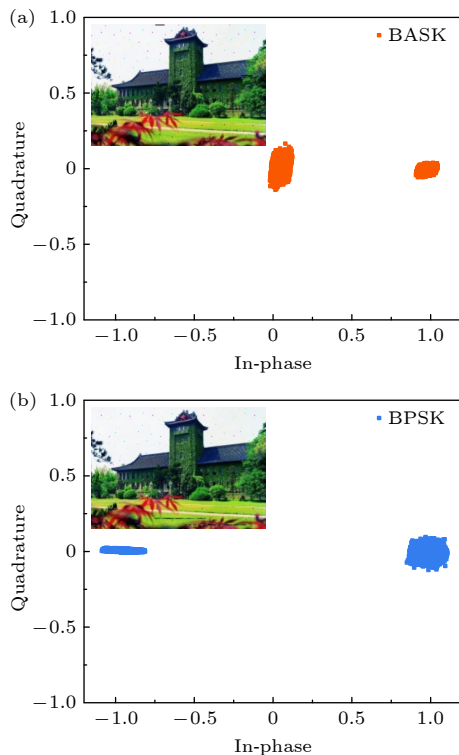


图 10 (a) BASK 解调星座图及还原图片; (b) BPSK 解调星座图及还原图片

Fig. 10. (a) BASK constellation diagram and the recovered image; (b) BPSK constellation diagram and the recovered image.

- 203903.
- [12] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [13] Dabidian N, Dutta-Gupta S, Kholmanov I, Lai K, Feng L, Jin M Z, Trendafilov S, Khanikaev A, Fallahazad B, Tutuc M, Belkin M A, Shvets G 2016 *Nano Lett.* **16** 3607
- [14] Zeng C, Lu H, Mao D, Du Y Q, Hua H, Zhao W, Zhao J L 2022 *Opto-Electron. Adv.* **5** 200098
- [15] Chu C H, Tseng M L, Chen J, Wu P C, Chen Y H, Wang H C, Chen T Y, Hsieh W T, Wu H J, Sun G, Tsai D P 2016 *Laser Photonics Rev.* **10** 986
- [16] Shaltout A M, Shalaei V M, Brongersma M L 2019 *Science* **364** 3100
- [17] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** 218
- [18] Li L L, Cui T J, Ji W, Liu S, Ding J, Wan X, Li Y B, Jiang M H, Qiu C W, Zhang S 2017 *Nat. Commun.* **8** 197
- [19] Chen K, Zhang N, Ding G W, Zhao J M, Jiang T, Feng Y J 2020 *Adv. Mater. Technol.* **5** 1900930
- [20] Chen K, Feng Y J, Monticone F, Zhao J M, Zhu B, Jiang T, Zhang L, Kim Y J, Ding X M, Zhang S, Alu A, Qiu C W 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606422
- [21] Tang K, Hu Q, Zhao J M, Chen K, Feng Y J 2022 *J. Commun.* **43** 24 (in Chinese) [唐奎, 胡琪, 赵俊明, 陈克, 冯一军 2022 通信学报 **43** 24]
- [22] Zhang N, Zhao J M, Chen K, Zhao J M, Jiang T, Feng Y J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 178102 (in Chinese) [张娜, 赵健民, 陈克, 赵俊明, 姜田, 冯一军 2021 物理学报 **70** 178102]
- [23] Zheng Y L, Chen K, Xu Z Y, Zhang N, Wang J, Zhao J M, Feng Y J 2022 *Adv. Sci.* **9** 2204558
- [24] Zhao H T, Shuang Y, Wei M L, Cui T J, Hougne P D, Li L L 2020 *Nat. Commun.* **11** 3926
- [25] Cui T J, Liu S, Bai G D, Ma Q 2019 *Research* **2019** 2584609
- [26] Hu Q, Chen K, Zheng Y L, Xu Z Y, Zhao J M 2023 *Nanophotonics* **12** 1327
- [27] Chen K, Guo W L, Ding G W, Zhao J M, Jiang T, Feng Y J 2020 *Opt. Express* **28** 12638
- [28] Ten Brink S, Kramer G, Ashikhmin A 2004 *IEEE Trans. Commun.* **52** 670
- [29] Xing L J, Li Z, Bai B M, Wang X M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4695 (in Chinese) [邢莉娟, 李卓, 白宝明, 王新梅 2008 物理学报 **57** 4695]

Reconfigurable metasurface achieved dynamic beam control and information modulation of L-band beams^{*}

XU Yifan¹⁾ DENG Ye¹⁾ TONG Wanting¹⁾ WANG Haifeng²⁾³⁾
 WANG Xueyun²⁾³⁾ ZHAO Junming¹⁾ JIANG Tian¹⁾
 ZHANG Shengkang²⁾³⁾† CHEN Ke¹⁾‡ FENG Yijun¹⁾

¹⁾ (School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

²⁾ (Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

³⁾ (Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100854, China)

(Received 30 November 2024; revised manuscript received 15 March 2025)

Abstract

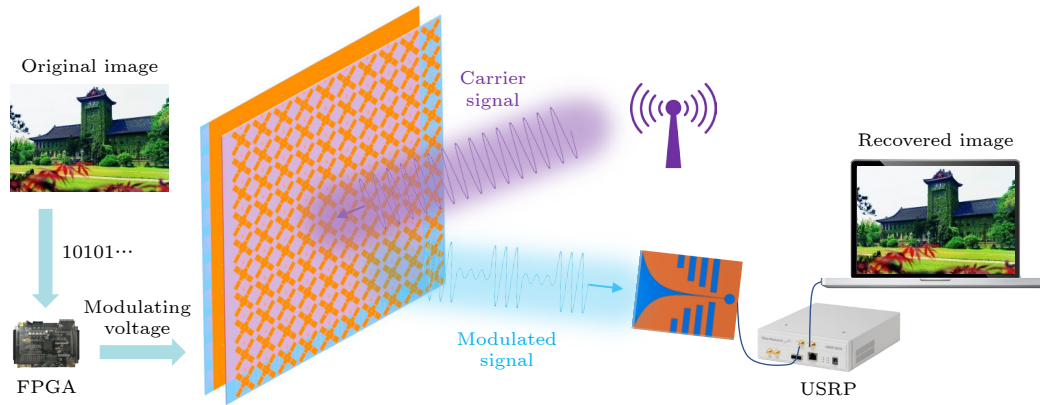
In this paper, a method of designing broadband reconfigurable polarization-converting metasurface operating in L-band is proposed. This method can also be used to directly modulate the information by using two modulation modes: binary amplitude shift keying (BASK) and binary phase shift keying (BPSK). Switching the ON/OFF state of PIN diode can be used to modify the amplitude and phase responses of the cross-polarized reflection of the element in a frequency band of 1.17–1.66 GHz, thereby creating a 1-bit digital coding meta-atom. By changing the real-time coding patterns of amplitude and phase, the reconfigurable metasurface can control beams and information modulation. Simulation results show that by changing the coding patterns of the metasurface, twin-beams and four-beams with different reflection angles can be obtained which fully validates the control ability of dynamic far-field beam. As an experimental verification, a reconfigurable metasurface consisting of 10×10 meta-atoms is fabricated, and its beam control and information modulation functions are

^{*} Project supported by the Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory Foundation, China (Grant No. 2023-JCJQ-LB-017).

† Corresponding author. E-mail: zhangsk@126.com

‡ Corresponding author. E-mail: ke.chen@nju.edu.cn

tested. The far-field patterns of the metasurface with different coding phase distributions are measured. Furthermore, modulation signals of varying high/low voltage levels and rates are loaded onto the metasurface, in order to control its modulation mode and rate. The modulated signals reflected from metasurface are captured by a high-speed radio-frequency (RF) oscilloscope at varying rates and reflection angles, and then demodulated so as to recover the original information. On this basis, a metasurface wireless communication system based on BASK and BPSK is constructed to transmit digital image information in a real-world environment. In the experiment, the image is first represented by a sequence of 0 bit and 1 bit, corresponding to the operational state sequence of the metasurface used for transmitting information. The field programmable gate array (FPGA) is then used to generate signals with high and low voltage levels in real time according to the sequence of working states of the metasurface, and to modulate the carrier signal irradiated onto the metasurface. Therefore, the signal is converted into a modulated signal and received by the antenna. Finally, the signal is demodulated by the universal software radio peripheral (USRP) and transmitted to the terminal equipment, yielding the constellation diagrams and enabling the recovering of the images. The image information recovered under both modulation schemes verifies that the system can achieve real-time modulation and transmission of digital information. The proposed metasurface and the design method may be used in many fields, such as satellite communications and digital broadcasting.



Keywords: reconfigurable metasurface, L-band, amplitude modulation, phase modulation

PACS: 81.05.Xj, 07.05.Tp, 03.65.Vf, 84.40.Ua

DOI: [10.7498/aps.74.20241668](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241668)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241668](https://cstr.net.cn/resultDetail.do?id=cstr&id=32037.14.aps.74.20241668)



可重构超构表面实现L波段波束动态调控及信息调制

许一帆 邓烨 佟琬婷 王海峰 王学运 赵俊明 姜田 张升康 陈克 冯一军

Reconfigurable metasurface achieved dynamic beam control and information modulation of L-band beams

XU Yifan DENG Ye TONG Wanting WANG Haifeng WANG Xueyun ZHAO Junming JIANG Tian
ZHANG Shengkang CHEN Ke FENG Yijun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 108101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241668

CSTR: 32037.14.aps.74.20241668

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241668>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

编码超构表面实现双波束独立可重构

Independent dual-beam control based on programmable coding metasurface

物理学报. 2021, 70(17): 178102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210344>

基于阶梯相位调制的窄谱激光主动照明均匀性

Active illumination uniformity with narrow spectrum laser based on ladderlike phase modulation

物理学报. 2021, 70(15): 154207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210228>

基于相位调制的高相干光源照明匀化方法

Illumination homogenization of highly coherent light source based on phase modulation

物理学报. 2024, 73(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240644>

基于电光晶体平板部分相位调制动态产生涡旋光束

Dynamic generation of vortex beam based on partial phase modulation of electro-optical crystal plate

物理学报. 2022, 71(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220835>

基于剪纸方法的一种可重构线极化转换空间序构超表面

Reconfigurable linear polarization conversion based on spatial-order kirigami metasurfaces

物理学报. 2021, 70(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210188>

动态可调谐的频域多功能可重构极化转换超表面

Dynamically tunable frequency-domain multifunctional reconfigurable polarization conversion metasurface

物理学报. 2022, 71(22): 224102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221256>