

时空编码超表面赋能雷达通信与电磁隐身一体化设计

张明^① 王哲^① 王博雅^① 杨琳^① 韩琦^①
何宇航^① 侯卫民^{*①} 李康^②

^①(河北科技大学信息科学与工程学院 石家庄 050018)

^②(西安电子科技大学集成电路学院 西安 710003)

摘要: 当前,传统雷达天线通过发射高频电磁信号以及材料结构设计实现主动电磁干扰和雷达散射截面缩小的带内隐身。同时,又需要大规模TR组件或机械控制实现多向雷达通信。因此,实现带内隐身与多向辐射的集成化动态调制,成为当前电磁调控领域面临的一项巨大技术挑战。在此,本工作提出了一种工作于X波段能够同时实现波束扫描和电磁隐身的时空编码超表面,该器件采用时-空相位联合编码策略,通过协同调控电磁波的空间域与频率域特性,重构传播方向并调控谐波功率分布,实现了谐波波束转向以及雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)缩减。作为概念验证,本工作采用印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)工艺制作了一个8×8的超表面模型,利用FPGA (Field-Programmable Gate Array)开发板进行控制并通过矢量网络分析仪采集回波信号增益。所设计的超表面成功实现-45°~+45°范围内波束扫描和回波增益降低最大值为14.83 dB的RCS缩减。相信该设计能够为自适应多维度电磁波调控及先进电磁对抗技术提供了新路径与实验支撑。

关键词: 超表面; 时空编码序列; 波束扫描; RCS缩减

中图分类号: TN828.4; TN26

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)00-0001-11

DOI: 10.11999/JEIT260536

CSTR: 32379.14.JEIT260536

1 引言

近几十年来,雷达探测技术取得了迅猛发展,与之相伴的雷达通信与探测技术也成为研究人员重点关注对象^[1,2]。当前,天线辐射主要通过机械扫描和电子扫描实现。机械扫描本质是改变物理指向的空间切换,通过机械结构驱动反射面、馈源或阵列整体进行方位或俯仰转动,改变波束指向^[3-5]。电子扫描则通过控制阵列天线单元的相位、频率或幅度,利用电磁波相干叠加原理改变主波束方向^[6-9]。

同时,受雷达监视系统带来的潜在威胁驱动,高性能伪装技术也受到广泛关注与研究。其核心策略主要分为两类,即RCS缩减与电磁干扰。RCS缩减技术是通过削弱目标反射信号强度,从根源上降低其被雷达探测发现的概率^[10-12]。基于电磁干扰的雷达伪装策略则是通过调制回波信号或发射高功率噪声来干扰目标识别^[13,14]。因此作为雷达系统的核心组件之一,辐射与隐身的集成设计尤为重要。特别关键的是,在不依赖大规模TR组件及主动电磁干扰技术的前提下,如何同时实现灵活的波束扫描与高效电磁伪装,已成为制约传统雷达系统向高性能、轻量化方向发展的核心难题。超表面的问世,为突破上述传统技术局限、构建具备集成化优势的新一代雷达系统提供了极具潜力的解决方案,也为相关领域的创新性研究开辟了新的方向。

超表面是一种由超原子二维周期性排列而成的电磁器件,通过精心设计和排列超原子,超表面几乎可以完全控制电磁波的偏振态^[15]、相位^[16]、振幅^[17],进而实现异常波束偏折^[18]、涡旋光^[19]、全息影像^[20]、RCS缩减^[10]等功能。与有源器件相集成的智能可重构超表面^[21-26],超原子具有动态的电磁响应,能够动态控制电磁波的相位、振幅、极化状态和频率^[23,24,26]。通过调整超表面的极化和相位编码,可以实现回波散射的相消干涉,模糊目标的几何特征,从而达到电磁隐身^[25,27,28]。通过动态控制超表面的相位编码,可以实现重构回波信号的传播

收稿日期: 2026-xx-xx; 改回日期: 2026-07-08; 网络出版: 2026-07-31

*通信作者: 侯卫民 jerry.ioa.bj@hotmail.com

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2022YFB4400400), 国家自然科学基金(62441401), 国家重点实验室基础科学研究创新基金(IFN20230113), 河北省重大科技支撑项目(24290201Z), 河北省自然科学基金(F2024208020, F2026208017), 河北省教育厅青年拔尖人才项目(BJK2024089), 河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2026090)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB4400400), National Natural Science Foundation of China (N0. 62441401), National Key Laboratory of Basic Scientific Research for Innovation Fund (No. IFN20230113), the Major Science and Technology Support Project of Hebei Province (No.24290201Z), Hebei Natural Science Foundation (No. F2024208020 and F2026208017), Science and Technology Project of Hebei Education Department (No. BJK2024089), Hebei Provincial Department of Education Grant for Cultivating Innovative Ability of Postgraduate Students (CXZZSS2026090)

方向和谐波功率分布, 能量也重新分布在多个谐波上^[23-25]。因此, 超表面能够静态或动态地控制散射电磁波, 从而实现雷达通信和电磁隐身能力。在此背景下, 提出了基于超表面与天线集成设计的辐射隐身结构。然而, 先前一些工作在将超原子的相位响应映射为编码元素的过程中, 引入了一定的相位误差, 导致在波束扫描时出现双波束或者更大的旁瓣^[23,24,29]。在空间重构的设计中, 大多采用“棋盘格”, “行列间隔”的交替变换设计, 虽然能够一定程度上降低器件的RCS, 但这样的空间编码策略较为单一, 较难实现多维度调控^[27-29]。在辐射与隐身功能的集成设计中, 在辐射结构顶部设计超表面, 可以实现带内交叉极化隐身。然而, 波束扫描功能仍依赖后端TR组件实现, 并且由于辐射和散射之间的耦合, 在主极化上实现波束扫描和电磁隐身的集成设计仍然是十分困难的^[30,31]。

在此, 本文提出了一种能够同时实现波束扫描和RCS缩减的时空编码超表面。两种工作模式的编码序列均利用二进制粒子群算法(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)设计。在辐射模式下, 通过在时间域内循环切换编码序列, 使各次谐波产生差异化的相位分布, 从而将各次谐波分别偏折至不同方位角度, 实现波束扫描。在散射模式下, 利用时空编码序列, 将中心频率入射波的功率分配到不同方位角度方向和各次谐波频率上, 实现了RCS缩减。为了验证所提出的辐射隐身超表面功能特性, 我们制备并测试了一个 8×8 的时空编码超表面模型。辐射模式下, 实测各次谐波波束偏折

角度分别为 $+14^\circ$ 、 $+32^\circ$ 、 $+46^\circ$ 、 -15° 、 -28° 、 -44° 和 $+2^\circ$, 与目标角度误差均值为 1.3° , $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ 以及基波旁瓣电平均值达 -10.59 dB。散射模式下, 中心频率对应的回波方向曲线峰值降低 -11.56 dB, 且在 9.9 GHz $\sim$ 10.1 GHz频率范围内回波增益降低均值为 10 dB。所设计的超表面展现出精准的波束扫描和优秀的RCS缩减特性。该项工作有望为辐射隐身超表面拓宽应用前景, 并在带内通信、隐身等领域中展现巨大优势。

2 方法原理

图1展示了所设计的时空编码超表面, 超表面具有辐射和散射两种工作模式, 由集成PIN二极管和矩形贴片天线的超原子组成。每一列超原子共享一路控制信号, 通过独立控制超原子上的PIN二极管, 可以实现1位相位调制。利用FPGA以及驱动电路向超表面发送周期编码控制信号, 在辐射模式下, 入射电磁波以及各次谐波的相位分布被重构, 进而指向不同方向, 在散射模式下, 先通过空间编码的策略将入射电磁波分散到不同空间方位上, 然后通过时间编码策略, 将各次谐波功率重构, 进而实现电磁隐身。因此, 所设计的超表面能够实现带内定向辐射和隐身的动态调制的特性。

2.1 超原子的设计

图2(a), 图2(b)展示了所设计的超原子三维结构和顶部视图, 其周期 $P=15$ mm。超原子由两层金属结构和中间介电基板组成。其中金属材料为铜(电导率 $\sigma=5.96 \times 10^7$ S/m), 金属层从上到下依次为矩形

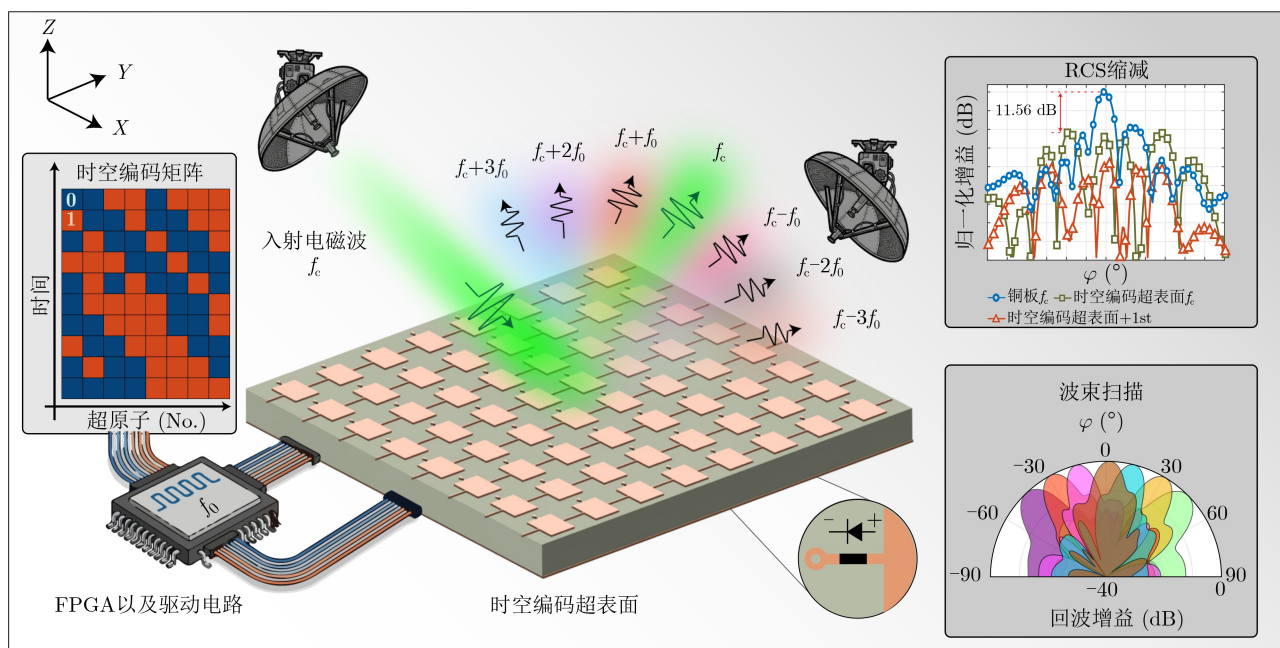


图1 提出的集成有辐射-隐身功能的时空编码超表面工作原理示意图

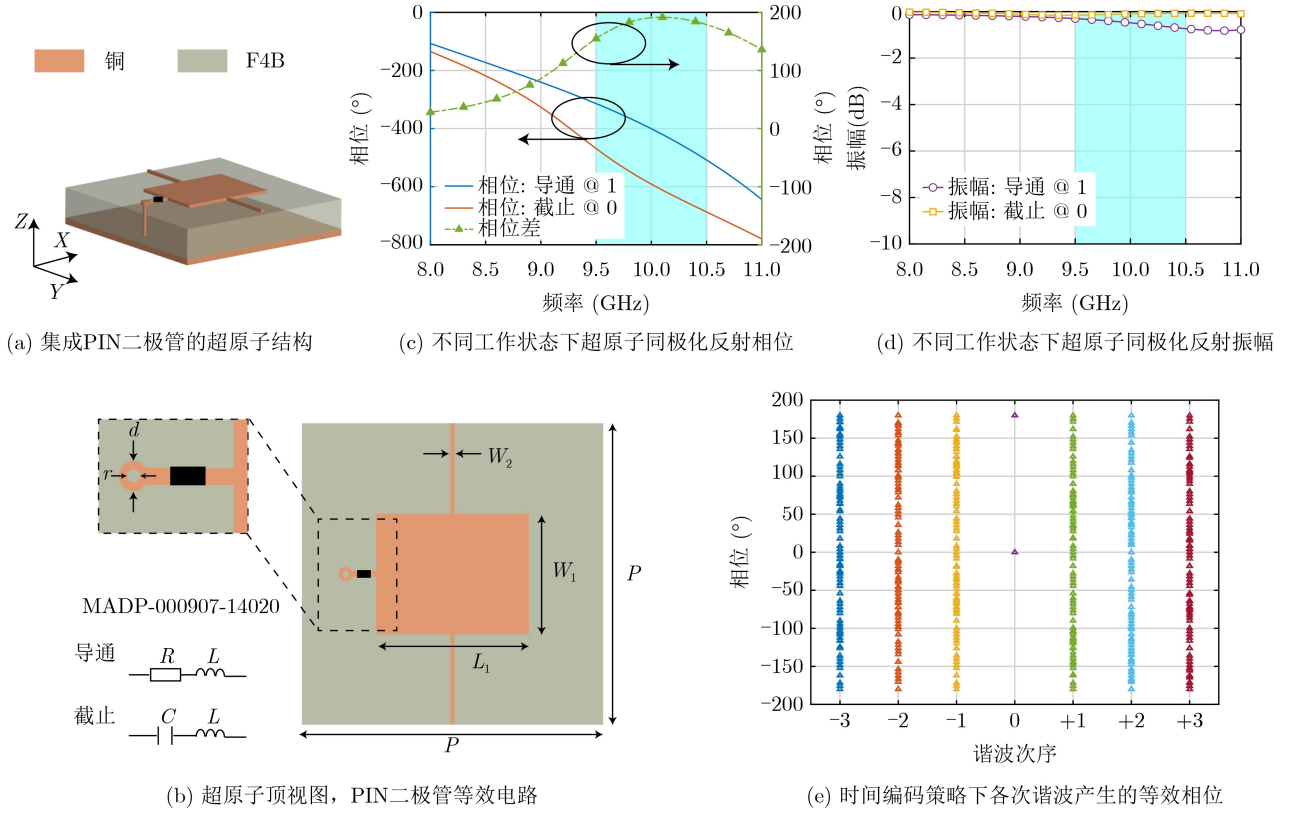


图 2 超原子的结构, 电磁响应仿真结果。时间编码调控下, 各次谐波等效相位分布。仿真通过 CST Microwave Studio(CST)频域求解器完成, x、y 方向均采用 unit cell 边界条件, z 方向采用 open 边界条件, 频率范围覆盖 8~11 GHz

贴片天线和接地层, 厚度为 0.018 mm。通过参数化扫描 ($7 \text{ mm} \leq L_1 \leq 8 \text{ mm}$, 步长 0.2 mm; $5.5 \text{ mm} \leq W_1 \leq 6.5 \text{ mm}$, 步长 0.5 mm), 确定矩形贴片天线的长度 $L_1 = 7.6 \text{ mm}$, 宽度 $W_1 = 6 \text{ mm}$ 。直流偏置线宽度 $W_2 = 0.2 \text{ mm}$ 。PIN 二极管正极连接贴片天线, 负极通过金属通孔与接地层连接。PIN 二极管型号为: MADP-000907-14020。在导通时, 其等效电路可以看作是一个 $R = 7.8 \Omega$ 的电阻和一个 $L = 30 \text{ pH}$ 的电感串联, 在截止状态下, 等效电路可以看作是一个 $C = 0.028 \text{ pF}$ 的电容和一个 $L = 30 \text{ pH}$ 的电感串联^[21]。金属通孔外径 $d = 0.7 \text{ mm}$, 内径 $r = 0.35 \text{ mm}$ 。中间介电基板材料为 F4BTMS265, 厚度为 2 mm, 介电常数 $\varepsilon = 2.65$, 损耗角正切值为 0.001^[15]。图 2(c), 图 2(d) 展示了超原子的同极化反射相位和振幅的电磁响应特性。可以观察到, 在 9.5 GHz~10.5 GHz 的工作频率范围内, X 极化波入射时, 无论 PIN 二极管处于导通状态或截止状态, 超原子的同极化反射振幅均大于 -0.75 dB, 展现出近乎无损耗的同极化回波反射特性。同时, 两种工作状态对应的同极化反射相位差值为 $180^\circ \pm 20^\circ$, 特别是在 10.0 GHz 处十分接近理想的 180° 相位差, 适应 1-bit 相位编码的要求。同时, 为使 PIN 二极管在导通时处于最佳工作状态, 本工作特别设计了一个驱动电路, 以满足 PIN 二极管导通时对载流子注入的需求。

2.2 时空编码超表面模型

对于一个由 $M \times N$ 个超原子组成的时空编码超表面, 每个超原子都集成有 PIN 二极管, 通过向 PIN 二极管施加控制电压, 可以动态的将单元的反射振幅或相位控制在离散状态。因此, 时空编码超表面的时域远场模型可由下式表示:

$$F(\theta, \varphi, t) = \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^M E_{pq}(\theta, \varphi) \Gamma_{pq}(t) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda_c} [(p-1)d_x \sin \theta \cos \varphi + (q-1)d_y \sin \theta \sin \varphi] \right\} \quad (1)$$

其中, $E_{pq}(\theta, \varphi)$ 是在中心频率 f_c 处计算得到的 (p, q) 位置处超原子的远场散射模式, θ 和 φ 分别为仰角和方位角, d_x 和 d_y 分别为沿 x 和 y 方向的超原子周期, λ_c 是中心工作波长。 $\Gamma_{pq}(t)$ 是 (p, q) 位置处超原子的时间调制反射系数, 假设其为时间的周期函数, 并在一个周期内定义为移位脉冲函数的线性组合, 则有:

$$\Gamma_{pq}(t) = \sum_{n=1}^L \Gamma_{pq}^n U_{pq}^n(t) (0 < t < T_0) \quad (2)$$

其中 $U_{pq}^n(t)$ 是一个调制周期为 T_0 的周期脉冲函数, 在每个周期内有:

$$U_{pq}^n(t) = \begin{cases} 1, & (n-1)\tau \leq t \leq n\tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\tau = T_0/L$ 表示脉冲的宽度, L 代表单个周期时间编码序列的长度, 因此是一个正整数。 $\Gamma_{pq}^n = A_{pq}^n \exp(j\varphi_{pq}^n)$ 是在 $(n-1)\tau \leq t \leq n\tau$ 的时隙内, 第 (p, q) 个超原子在中心频率处的反射系数, A_{pq}^n 和 φ_{pq}^n 分别表示振幅和相位。将 $U_{pq}^n(t)$ 分解为傅里叶级数, 则有:

$$U_{pq}^n(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{pq}^{mn} \exp(j2\pi m f_0 t) \quad (4)$$

其中, $f_0 = 1/T_0$, 并且傅里叶级数的系数可由下式计算得出:

$$c_{pq}^{mn} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} U_{pq}^n(t) \exp(-j2\pi m f_0 t) dt \quad (5)$$

因此, 周期函数 $\Gamma_{pq}(t)$ 的傅里叶级数的系数可表示为:

$$\begin{aligned} a_{pq}^m &= \sum_{n=1}^L \Gamma_{pq}^n c_{pq}^{mn} = \sum_{n=1}^L \frac{\Gamma_{pq}^n}{T_0} \int_{(n-1)\tau}^{n\tau} \exp(-j2\pi m f_0 t) dt \\ &= \sum_{n=1}^L \frac{\Gamma_{pq}^n}{L} \sin c\left(\frac{\pi m}{L}\right) \exp\left[\frac{-j\pi m(2n-1)}{L}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

最后, 时空编码超表面在第 m 次谐波频率 $f_c + m f_0$ 处的远场散射模式可以写为:

$$\begin{aligned} F_m(\theta, \varphi) &= \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^M E_{pq}(\theta, \varphi) \\ &\exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_c} \left[(p-1) d_x \sin \theta \cos \varphi \right. \right. \\ &\left. \left. + (q-1) d_y \sin \theta \sin \varphi \right] \right\} a_{pq}^m \end{aligned} \quad (7)$$

在构建时空编码超表面远场散射模型时, 为简便运算, 超原子之间的相互耦合被忽略, 并且假设超原子为各向同性(即 $E_{pq}(\theta, \varphi) = 1$)。因此, 对于任意的三维时空编码序列, 可以通过公式(7)计算时空编码超表面在任何谐波频率下的远场散射模式。同时, 假设每个单元的反射振幅 A_{pq}^n 是均一的, 其反射相位是时间的周期函数, 将反射相位 “0°” 映射为编码元素 “0”, 将反射相位 “180°” 映射为编码元素 “1”。根据公式(6), 对于任意编码序列, 我们能计算出特定谐波频率下超原子的所有等效相位分布, 如图2(e)所示。此后, 本文所有设计均采用相位编码调制方案。

正如前文所述, 本工作设计了一个由 8×8 个超原子组成的编码超表面, 并且每一列的8个编码超

原子共享相同的控制信号。在此, 本文将时间编码的位宽度设置为10, 即一个时间编码周期包含10个均匀时隙。因此, 三维时空编码矩阵转化为二维矩阵。即使如此, 满足条件的所有可能解仍然存在 2^{80} 种可能, 为实现快速搜索到满足要求的最优解, 本文采用BPSO算法对时空编码序列进行优化。如图3(a)所示, 在BPSO优化算法中, 一组编码序列对应一个粒子, 即一个 8×10 的矩阵对应一个粒子, 矩阵中的元素为 “0” 或 “1”, 对应编码超原子不同的反射相位。在生成初始粒子群后, 逐一计算每一个粒子与目标函数的适应度, 在此特别强调, 为增强算法全局搜索能力, 降低与目标功能的误差并获得符合要求的时空编码序列, 本文将粒子群规模设置为30, 并采用随迭代次数变化的动态惯性权重系数。然后将所有粒子的适应度和设置的阈值相比较, 满足条件的即可作为时空编码序列输出。对于初代粒子群, 与目标函数适应度最小的粒子就是最优粒子和全局最优粒子。如果初代粒子群中, 没有满足条件的粒子输出, 则根据粒子移动速度进行元素更新。值得注意的是, 本文引入Sigmoid函数约束粒子移动速度至 $[0, 1]$ 区间, 以此将粒子各分量映射更新为 0、1 二进制取值; 随后采用适应度函数对更新后的粒子重新评价, 迭代寻优得到最优时空编码矩阵。为实现各次谐波定向波束扫描、调控波束指向至目标角度, 本文定义适应度函数如下:

$$\begin{aligned} fitness(x) &= w_1 \cdot \left(\sum_{m=-3}^3 |\theta_0^m - \theta_d^m| \right) \\ &+ w_2 \cdot \left(\sum_{m=-3}^3 |SLL_0^m - SLL_d^m| \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, θ_0^m 表示由当前编码序列计算得到的 m 次谐波波束偏折角度, θ_d^m 表示期望的 m 次谐波波束偏折角度。 SLL_0^m 表示由当前编码序列计算得到的 m 次谐波波束的旁瓣电平, SLL_d^m 表示期望的 m 次谐波的旁瓣电平。 w_1 和 w_2 分别代表偏折角度误差权重和旁瓣电平误差权重, 本文中二者分别设置为1与0.2。图3(b)给出适应度函数随迭代次数的变化曲线, 算法迭代300代后适应度值趋于收敛稳定, 且数值降至10以内。图3(c)为经BPSO优化求解后、可实现波束扫描的最优时空编码序列。

2.3 用于波束扫描的辐射超表面设计

本文所提出的面向雷达通信一体化的波束扫描时空编码超表面, 其核心调控机理源自相控阵理论。当1-bit时空编码序列施加于所设计的超表面时, 可在不同谐波频率下形成差异化的等效相位分布, 进而将各次谐波波束偏转到不同角度, 实现波束扫描

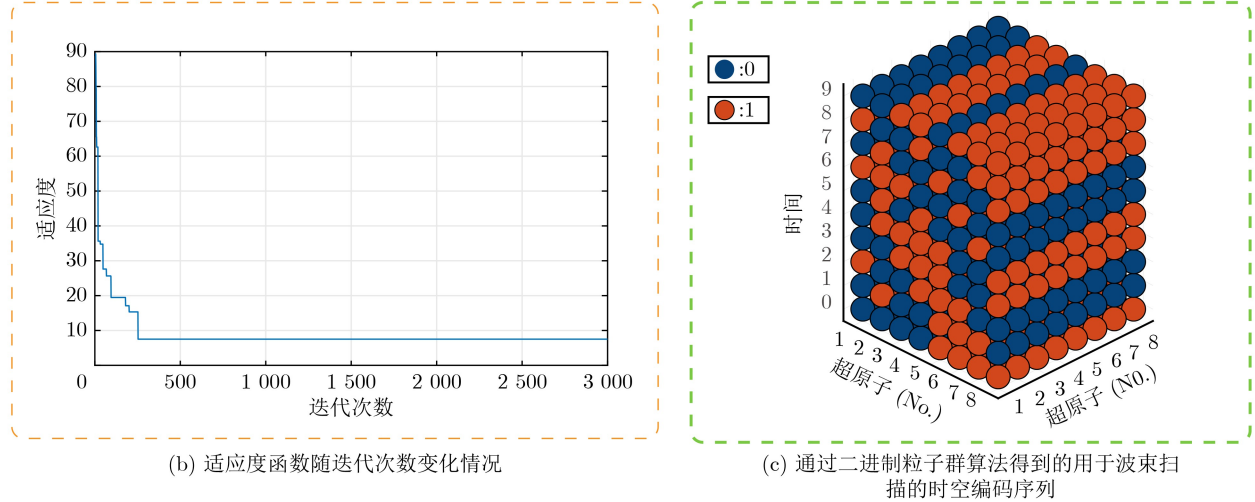
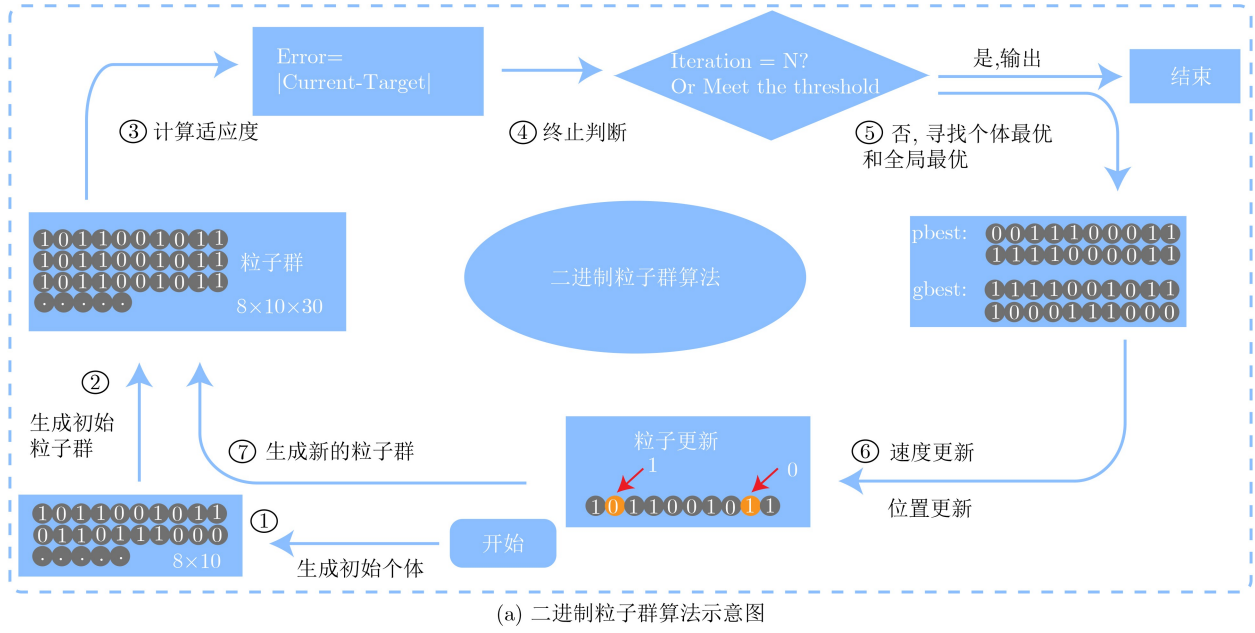


图 3 BPSO算法流程示意图, 适应度函数随迭代次数变化情况以及通过BPSO算法搜索出的用于波束扫描的时空编码序列

功能。本文以 8×8 超原子阵列构成的时空编码超表面为仿真模型, 采用图4(b)给出的编码序列; 各超原子集成 PIN 二极管, 导通、截止两种工作状态分别对应编码“1”与“0”。完整时空编码序列经由 FPGA 与驱动电路输出并加载至超表面阵列, 根据公式(6)可知, 入射电磁波的基波及各次谐波会产生差异化的相位分布。对于各次谐波而言, 由于每一列超原子采用相同的编码序列, 而列与列之间的编码序列存在差异, 在行方向上必然形成相位梯度。根据广义斯涅尔定律, 不同谐波因具有不同的相位梯度, 将产生不同的波束偏折角度。图4(a)给出了辐射模式下各次谐波远场一维方向图数值模拟结果。通过对超原子工作状态的周期性控制, ± 3 次、 ± 2 次、 ± 1 次谐波及基波分别偏折至方位角 $\pm 45^\circ$ 、 $+31^\circ$ 、 -29° 、 $+13^\circ$ 、 -14° 及 0° 。图4(c)、图4(d)展示了各次谐波二维和三维远场散射数值模

拟结果。需要特别说明的是, 根据前一章中编码超原子等效相位的相关阐述, 对于基波, 由公式(6)得到的等效相位分布仅存在 0° 和 180° 两种情况。若相位梯度为 180° , 理论上会产生 90° 的波束偏折角度, 该偏折角度在实验测试中难以实现, 且实际应用场景极为狭窄, 因此本研究将基波偏折角度设定为 0° 。从图4(a)的模拟结果可以看出, 各次谐波不仅能够精确偏折至目标角度, 其旁瓣电平平均值还降低至 -10 dB。综上, 本文所提出的波束扫描超表面展现出优异的波束扫描性能及高主瓣增益特性, 在雷达通信领域具有广阔的应用潜力。

2.4 用于RCS缩减的隐身超表面设计

超表面馈电网络采用列共用控制电压的布线方案, 因此空间编码仅能沿行向实现相位调控, 各列在完整调制周期内保持一致配置。图5(a)展示了优化后的空间编码策略, 由具有互补状态的二进制数

表示, 其中0代表反射相位为 0° , 1代表反射相位为 180° , 分别用蓝色圆点和橙色圆点表示。采用这样的空间编码策略的主要目的是, 将入射电磁波向各个方向散射, 从而降低主瓣增益。图5(d)展示了采用空间编码策略下的回波增益截面图。从图中可以看出, 最大主瓣增益相较于入射波降低9.54 dB。随后通过频谱谐波最小化进行全局优化, 得到了最优的时间编码序列“0100111010”。图5(b)展示了优化

后的时空编码序列。图5(c)展示了在时间编码策略下-25次~+25次谐波的频谱, 利用时间编码的策略将入射波功率重新分布到各界谐波的同时去抑制基波的功率, 其中 ± 1 次谐波的能量最高。并且图5(e)展示了采用时空编码调制策略的+1次谐波二维散射图, 主瓣减低了13.60 dB。数值仿真结果表明采用时空编码调制的策略在散射抑制方面是优于单纯的空间编码。

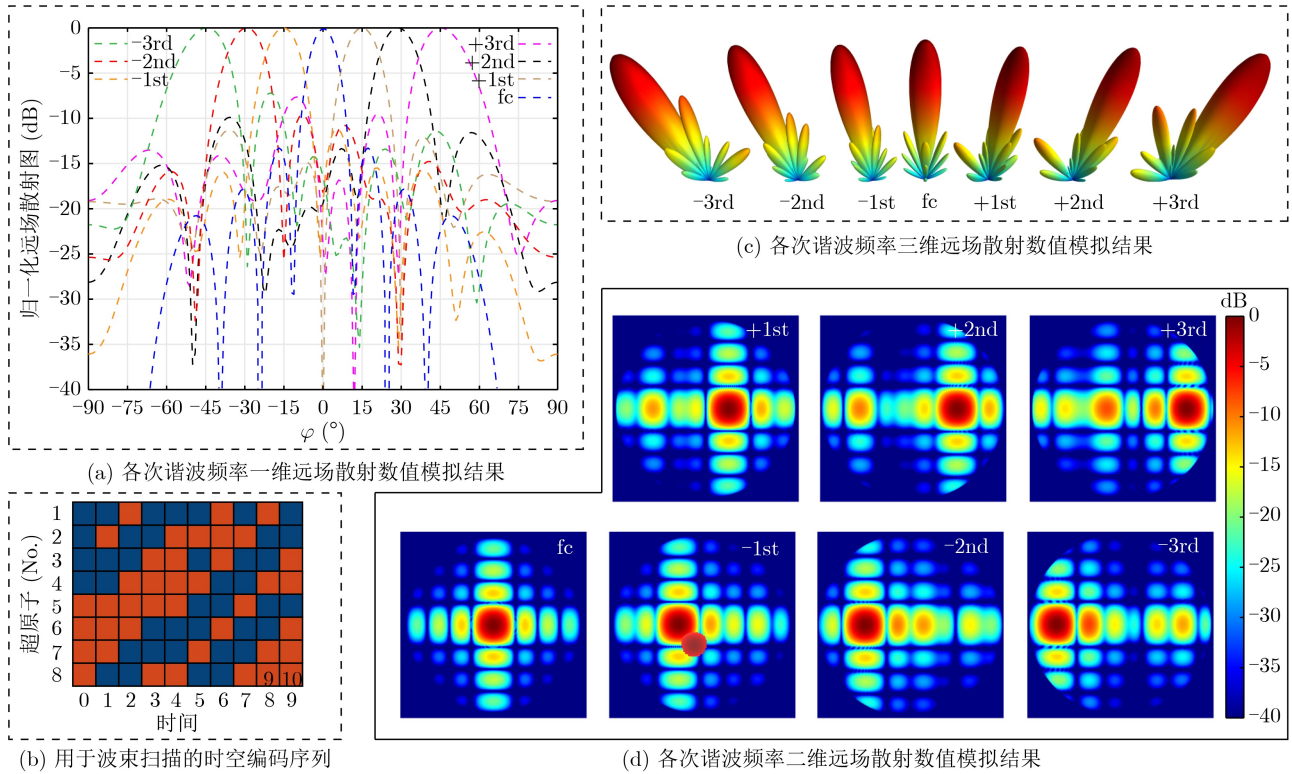


图 4 用于波束扫描的时空编码超表面一维、二维、三维远场散射数值模拟结果以及对应的时空编码序列

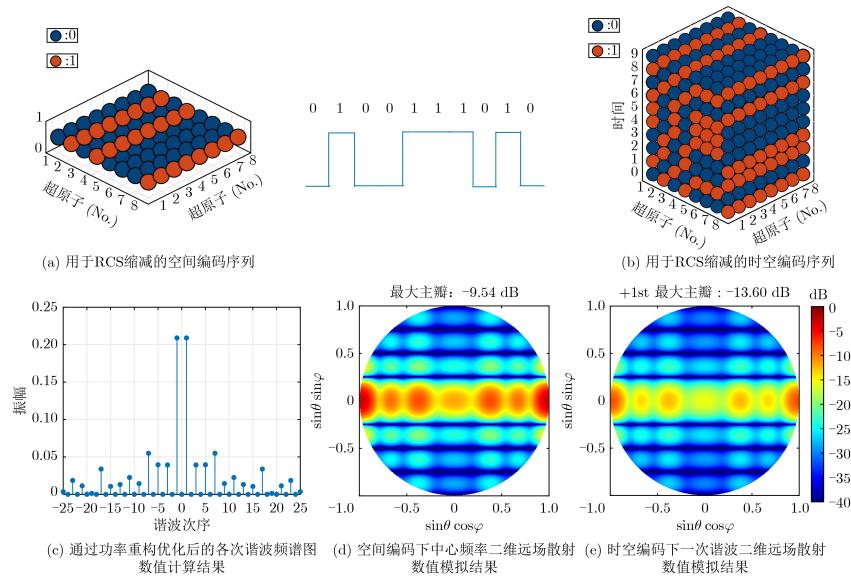


图 5 用于RCS的时空编码序列, 各次谐波频谱图以及二维远场散射数值模拟结果

3 实验

本文加工了一套 8×8 超原子阵列构成的超表面实物样品, 采用工艺成熟、成本低廉的PCB印制电路板工艺制备。图6(b)为单元细节, 各超原子通过表面贴装技术(Surface Mount Technology, SMT)焊接集成PIN二极管; 超表面底层布设完整金属接地层, 并焊接八路馈电网络接口插座。为抑制高频入射电磁波与杂散信号对时空编码控制信号的干扰, 馈电输入端串联 2.4 nH 电感构成射频扼流结构。系统采用Xilinx Artix-7系列FPGA开发板输出多路动态时空编码控制信号, 开发板系统时钟为 50 MHz , 时序编码生成程序预先固化至片外Flash存储芯片。时间编码序列调制周期 $T_0=2 \text{ }\mu\text{s}$, 脉冲宽度 $\tau=0.2 \text{ }\mu\text{s}$, 对应的系统调制频率 $f_0=0.5 \text{ MHz}$ 。需说明的是, FPGA 通用IO口输出驱动电流有限, 无法直接驱动整列超原子单元。为此本文专门设计配套驱动电路, 电路结构如图6(c)所示, 核心器件选用Microchip TC4427AEPA高速栅极驱动芯片, 可对 FPGA 输出控制信号进行功率放大, 输出适配超原子开关的高速、稳定驱动电平。图6(d)以编码序列“1100010011”为例, 给出FPGA联合驱动电路生成的时序编码方波实测波形。

实验测试平台如图6(e)所示, 测试核心设备为是德Keysight P9374A矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA), 配套S97082A功能选件。矢量网络分析仪经由数据线缆与上位机连接,

完成测试数据的实时观测与后续处理; 仪器输出激励信号并经发射喇叭天线照射待测超表面, 阵列反射回波由波导探头接收后回传至VNA完成散射参数采集。为保证实测效果与仿真设计保持一致, 本文引入相位补偿方案: 在超表面编码设计阶段充分考虑发射天线带来的球面波前效应, 对各阶谐波等效相位分布进行预校正, 抵消球面波前引入的相位偏差, 使超表面在预设焦距下实现目标电磁调控性能。

依托FPGA向各超原子加载适配波束扫描的时空编码序列, 可完成单元 1 比特相位调控, 无需搭载收发(TR)组件即可实现二维波束扫描。通过将驱动电路输出端与超表面模型馈电接口相连, 对波束扫描模式进行了测试。将信号源端口频率设置为 10.0 GHz , 即 $f_c=10.0 \text{ GHz}$ 。接收端频率分别设置为 ± 1 、 ± 2 、 ± 3 次谐波以及基波对应的频率。对超表面XZ面即E面进行测试。图7(a)~图7(g)展示了各次谐波E面测试结果。波束偏折角度分别为 $+14^\circ$ 、 $+32^\circ$ 、 $+46^\circ$ 、 -15° 、 -28° 、 -44° 和 $+2^\circ$, 实测波束指向角度与目标角度平均误差为 1.3° 。表1展示了不同情境下各次谐波目标偏折角度、模拟偏折角度与实测偏折角度的对比。同时, ± 1 、 ± 2 以及基波的旁瓣增益均值相较于主瓣降低达 10.59 dB 。但是值得注意的是, 由于所制造的超表面模型口径只有4个波长宽($D=4\lambda$), 且在优化编码序列时没有关注每一列超原子之间的相位梯度, 而是更加关注由编码序列计算的远场方向图中主瓣指向角度, 这

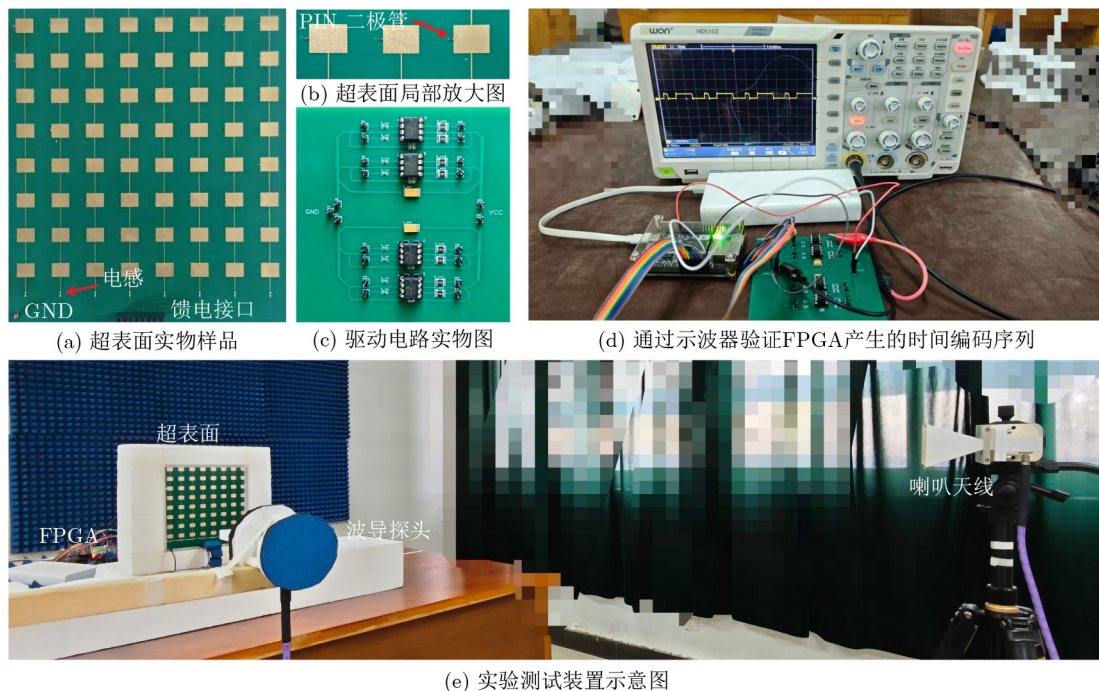


图 6 制造的超表面模型, 局部放大图, 驱动电路, 生成的时空编码控制信号以及实验测试环境示意图

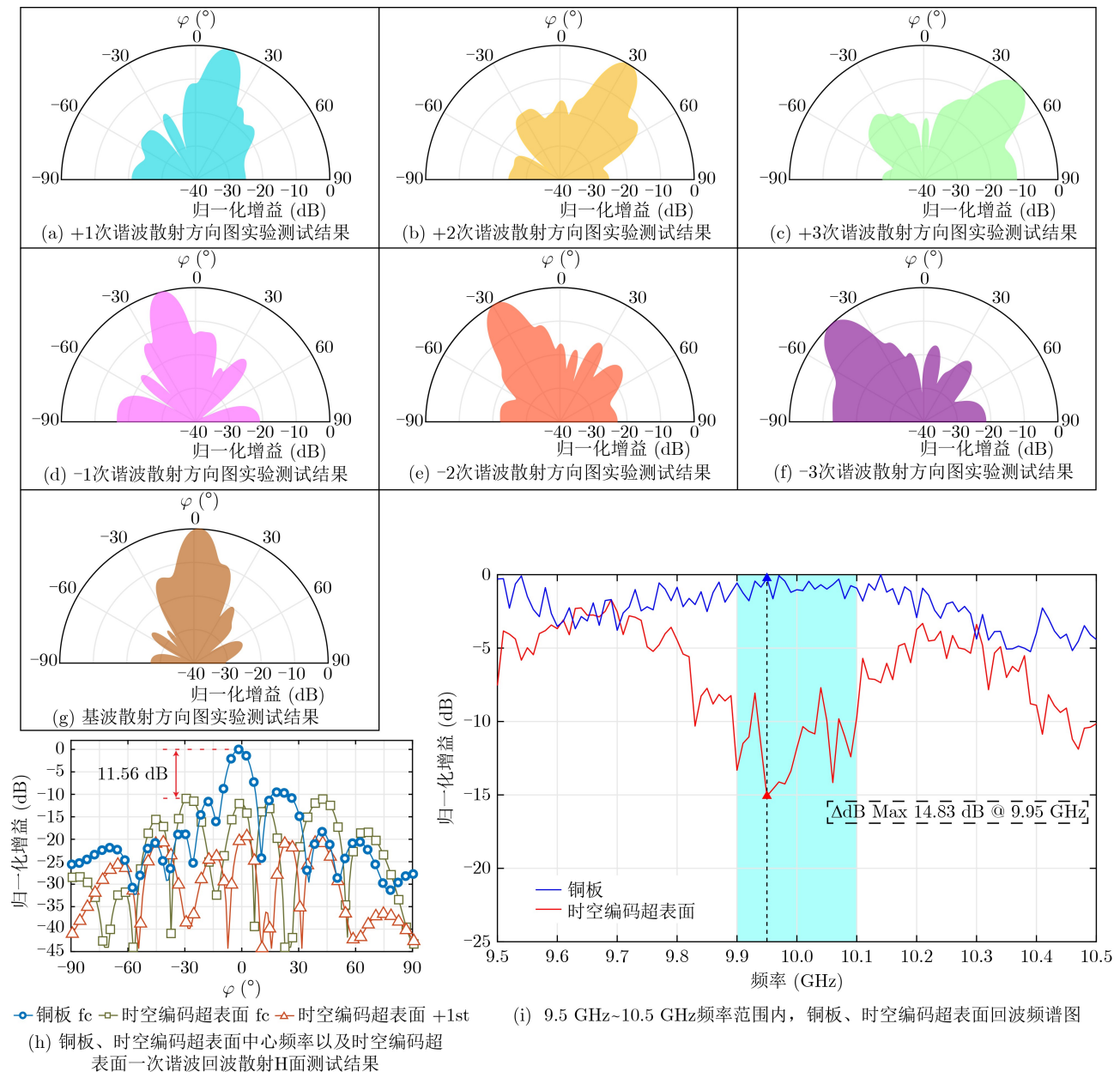


图 7 辐射模式下各次谐波散射方向图测试结果，散射模式下铜板、超表面散射方向图和频谱图测试结果

表 1 各次谐波不同情景下的偏折角度

谐波次序	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
目标偏折角度(°)	-45	-30	-15	0	15	30	45
模拟偏折角度(°)	-45	-29	-14	0	13	31	45
实测偏折角度(°)	-44	-28	-15	2	14	32	46

使得超原子间的相位梯度与所需相位梯度有一定的误差，即±3次谐波E面测试结果相较于其他次谐波产生主瓣变宽的结果。总之，从实验结果可以看出，在10.0 GHz下，有喇叭天线激励的超表面天线在-45°~+45°展现出较为精确的波束扫描特性。

通过FPGA将超表面的工作模式切换为隐身模式，对所设计的超表面进行RCS缩减特性测试。为

定量评价超表面的RCS缩减性能，在测试过程中选择铜金属板作为参考对象。入射电磁波频率设置为10.0 GHz。图7(h)展示了在10.0 GHz入射下，铜板和超表面远场散射E面扫描结果。蓝色由空心圆形标记的曲线为铜板测试结果，绿色由空心矩形标记的曲线对应超表面10.0 GHz处回波散射曲线，红色由空心三角形标记的曲线对应超表面+1次谐波散

射曲线。从实验结果可以看出, 超表面10.0 GHz回波散射曲线峰值相较于铜板反射增益降低11.56 dB, 并且在方位角度上呈现多散射峰分布, 成功地将入射波散射到多个方向并降低主瓣增益。但是值得注意的是, 超表面中心频率散射曲线增益整体仍然高于其一次谐波散射曲线。究其原因, 与波束扫描功能相比, 通过超原子1-Bit相位调制实现中心频率回波的抑制, 是非常依靠相位精准度的, 由于超表面制造公差以及喇叭天线发出的电磁波不是完美的平面波, 导致实际测试效果是逊于数值模拟计算的, 其他工作也同样出现过此类现象^[27]。随后又在9.5 GHz~10.5 GHz范围内测试超表面法线方向的回波散射特性。如图7(i)所示, 蓝色曲线对应铜板的回波频谱图, 较为平坦。红色曲线对应超表面回波频谱图。可以看出, 超表面回波频谱图整体是低于铜板回波频谱图的, 并且在9.9 GHz~10.1 GHz范围内, 除去两个RCS缩减能力不是很理想的点(9.93 GHz, -8.07 dB; 10.04 GHz, -7.89 dB), 超表面整体回波增益相较于铜板降低达到10 dB并且在9.95 GHz处回波增益差异达到最大值, 为14.83 dB。因此采用时空编码调制的策略能够有效降低超表面的雷达散射截面积, 实现高性能电磁隐身能力。

4 结束语

本文设计一款基于相位调制的时空编码一体化辐射隐身超表面, 单元超原子具备1比特反射相位调控能力。工作于辐射模式时, 通过时域动态调制单元反射相位, 可在各阶谐波处构建差异化等效相位分布, 令不同谐波波束独立偏转至对应空间角度, 无需搭载移相收发(TR)组件即可完成二维波束扫描。工作于散射隐身模式时, 先依靠空间编码将基频入射电磁波能量扩散至全空间; 再配合时域编码策略重新分配各次谐波散射功率, 实现雷达散射截面(RCS)显著缩减, 达成电磁隐身效果。本文加工8×8阵列实物样机, 通过实测充分验证该超表面兼具波束辐射调控与电磁隐身双重性能。后续研究将进一步完善超原子独立调控方案, 发展幅相协同编码调控策略, 以实现性能更优的三维波束扫描与深度RCS抑制。该平面一体化超表面可在单一硬件平台兼容辐射与隐身两类功能, 大幅简化系统架构、降低硬件成本; 同时支持依据任务场景动态切换工作模式, 适配多样化使用需求, 在无线通信、雷达对抗等领域具备广阔应用前景。

参 考 文 献

- [1] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/](#)

[JEIT180515](#).

- XIAO Bo, HUO Kai, and LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](#).
- [2] 张若愚, 任红, 陈光毅, 等. MIMO雷达通信一体化: 波束图增益最大化波束成形设计[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(3): 687–695. doi: [10.11999/JEIT240631](#).
- ZHANG Ruoyu, REN Hong, CHEN Guangyi, et al. MIMO Dual-functional radar-communication: Beam pattern gain maximization beamforming design[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(3): 687–695. doi: [10.11999/JEIT240631](#).
- [3] ZHOU Xin, YANG Xu, JIANG Jiali, et al. Wide-angle high-precision electronically controlled continuous beam scanning implementation based on MLAS cascaded AFOC[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 173: 107926. doi: [10.1016/j.optlaseng.2023.107926](#).
- [4] BEIRANVAND B and MIRZAVAND R. Enhancing wireless applications through reconfigurable electro-mechanical reflectarray antenna design for beam steering[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 30140. doi: [10.1038/s41598-024-81421-y](#).
- [5] LOR C, PHON R, and LIM S. Reconfigurable transmissive metasurface with a combination of scissor and rotation actuators for independently controlling beam scanning and polarization conversion[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2024, 10: 40. doi: [10.1038/s41378-024-00671-y](#).
- [6] WANG Xuan, QIN Peiyuan, LE A T, et al. Beam scanning transmitarray employing reconfigurable dual-layer Huygens element[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(9): 7491–7500. doi: [10.1109/TAP.2022.3176857](#).
- [7] LOW K K W, KANAR T, ZIHIR S, et al. A 17.7–20.2-GHz 1024-element K-band SATCOM phased-array receiver with 8.1-dB/K G/T, $\pm 70^\circ$ beam scanning, and high transmit isolation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(3): 1769–1778. doi: [10.1109/TMTT.2022.3142275](#).
- [8] ZHANG Xiaosheng, KWON K, HENRIKSSON J, et al. A large-scale microelectromechanical-systems-based silicon photonics LiDAR[J]. *Nature*, 2022, 603(7900): 253–258. doi: [10.1038/s41586-022-04415-8](#).
- [9] ZHANG Jinfan and CHENG Yujian. K-/Ka-band planar shared-aperture beam-scanning array antenna for simultaneous transmitting and receiving low earth orbit satellite communication terminal[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(8): 6617–6627. doi: [10.1109/TAP.2023.3284163](#).
- [10] CHEN Jie, CHENG Qiang, ZHAO Jie, et al. Reduction of radar cross section based on a metasurface[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, 146: 71–76. doi: [10.2528/](#)

- PIER14022606.
- [11] 王玥, 姚震宇, 崔子健, 等. 基于超表面的超宽带线极化转换特性研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(12): 4116–4124. doi: [10.11999/JEIT220447](https://doi.org/10.11999/JEIT220447).
WANG Yue, YAO Zhenyu, CUI Zijian, *et al.* Research on ultra-wideband linear polarization conversion characteristics based on metasurfaces[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(12): 4116–4124. doi: [10.11999/JEIT220447](https://doi.org/10.11999/JEIT220447).
 - [12] XI Bin, XIAO Yu, DONG Hongwei, *et al.* Low-profile wideband 1-bit reconfigurable transmitarray with 2-D beam-scanning capacity[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(4): 3228–3237. doi: [10.1109/TAP.2023.3241338](https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3241338).
 - [13] FENG Dejun, XU Letao, PAN Xiaoyi, *et al.* Jamming wideband radar using interrupted-sampling repeater[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1341–1354. doi: [10.1109/TAES.2017.2670958](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2670958).
 - [14] WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, *et al.* Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming (ISRJ)[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2007, 50(1): 113–123. doi: [10.1007/s11432-007-2017-y](https://doi.org/10.1007/s11432-007-2017-y).
 - [15] 张明, 董朋, 陶恩, 等. 嵌套式超原子实现的无串扰频率-自旋复用多功能器件[J]. 电子与信息学报, 2026, 48(5): 1916–1926. doi: [10.11999/JEIT251202](https://doi.org/10.11999/JEIT251202).
ZHANG Ming, DONG Peng, TAO En, *et al.* Crosstalk-free frequency-spin multiplexed multifunctional device realized by nested meta-atoms[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2026, 48(5): 1916–1926. doi: [10.11999/JEIT251202](https://doi.org/10.11999/JEIT251202).
 - [16] WANG Ai, ZHU Jianqi, LI Ling, *et al.* Research progress on metasurface-enhanced photodetectors: A review[J]. *Opto-Electronics Plus*, 2026, 2(1): 250021. doi: [10.29026/oe.2026.250021](https://doi.org/10.29026/oe.2026.250021).
 - [17] YIN Yongyao, JIANG Qiang, WANG Hongbo, *et al.* Color holographic display based on complex - amplitude metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(1): 2400884. doi: [10.1002/lpor.202400884](https://doi.org/10.1002/lpor.202400884).
 - [18] QIU Jia, CHENG Tengyu, CHEN Yujie, *et al.* Efficient narrowband wavefront shaping with nonlocal metasurface based on generalized pancharatnam-berry phase[J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(32): e02499. doi: [10.1002/adom.202502499](https://doi.org/10.1002/adom.202502499).
 - [19] ZHANG Fei, GUO Yinghui, PU Mingbo, *et al.* Meta-optics empowered vector visual cryptography for high security and rapid decryption[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1946. doi: [10.1038/s41467-023-37510-z](https://doi.org/10.1038/s41467-023-37510-z).
 - [20] XU Ke, LIU Yuncheng, FAN Xuhao, *et al.* Simultaneous dynamic display of meta-hologram and meta-nanoprinting with high frame rate[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(6): 2400815. doi: [10.1002/lpor.202400815](https://doi.org/10.1002/lpor.202400815).
 - [21] YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, YANG Fan, *et al.* A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35692. doi: [10.1038/srep35692](https://doi.org/10.1038/srep35692).
 - [22] AWAN W A, HUSSAIN N, PARK S G, *et al.* Intelligent metasurface based antenna with pattern and beam reconfigurability for internet of things applications[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 92: 50–62. doi: [10.1016/j.aej.2024.02.034](https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.034).
 - [23] LIU Baiyang, ZHANG Qingfeng, and WONG H. Multifunctional reconfigurable intelligent surface for wideband beamforming and frequency-and-spatial-diverse microwave sensing[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(2): 1135–1148. doi: [10.1109/TAP.2024.3519781](https://doi.org/10.1109/TAP.2024.3519781).
 - [24] YIN Chen, CHEN Yuzhen, WANG Xiaoyi, *et al.* Miniaturized 2-bit reconfigurable metasurface for real-time EM wave manipulation[J]. *Optics Express*, 2025, 33(6): 12890–12900. doi: [10.1364/OE.558678](https://doi.org/10.1364/OE.558678).
 - [25] WEI Wenyue, SHI Yan, MENG Zankui, *et al.* Reconfigurable metasurface array for diverse retrodirective reflections and radar cross section reduction[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(19): 3737–3748. doi: [10.1515/nanoph-2024-0216](https://doi.org/10.1515/nanoph-2024-0216).
 - [26] HU Qi, ZHAO Jianmin, CHEN Ke, *et al.* An intelligent programmable omni-metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2100718. doi: [10.1002/lpor.202100718](https://doi.org/10.1002/lpor.202100718).
 - [27] MU Yajie, XIA Dexiao, HAN Jiaqi, *et al.* Time-space - coding radiation-stealth metasurface with amplitude - phase co-modulation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(46): 2407802. doi: [10.1002/adfm.202407802](https://doi.org/10.1002/adfm.202407802).
 - [28] LI Yujun, JIN Jing, YANG Zhengguang, *et al.* Low-RCS low-profile MIMO antenna and array antenna using a polarization conversion metasurface[J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 38771–38785. doi: [10.1364/oe.507087](https://doi.org/10.1364/oe.507087).
 - [29] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, *et al.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218. doi: [10.1038/lsa.2014.99](https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99).
 - [30] LIU Ying, ZHANG Wenbo, JIA Yongtao, *et al.* Low RCS antenna array with reconfigurable scattering patterns based on digital antenna units[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1): 572–577. doi: [10.1109/TAP.2020.3004993](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3004993).
 - [31] JIANG Lixin, LI Yongfeng, ZHENG Lin, *et al.* Smart metasurface for active and passive cooperative manipulation of electromagnetic waves[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(48): 54359–54368. doi: [10.1021/acsami.2c15768](https://doi.org/10.1021/acsami.2c15768).
- 张 明: 男, 副教授, 博士, 研究方向为电磁波调控、可重构超表面天线, 邮箱: zhangming5280@126.com.
王 哲: 男, 硕士生, 研究方向为可重构超表面天线.
王博雅: 男, 硕士生, 研究方向为可重构超表面天线.
杨 琳: 女, 副教授, 博士, 研究方向为微波毫米波集成电路、无

线通信射频前端芯片.

邮箱: jerry.ioa.bj@hotmail.com.

韩 琦: 男, 讲师, 博士, 研究方向为光通信和太赫兹电磁调控.

李 康: 男, 副教授, 博士, 研究方向为毫米波功率器件和太赫兹器件.

何宇航: 男, 讲师, 博士, 研究方向为新型半导体材料的太赫兹光

子学、电磁超材料的设计与调控.

侯卫民: 男, 教授, 博士, 研究方向为阵列信号处理、无线通信,

责任编辑: 马秀强

Space-time-coding metasurface Enabled Integrated Design of Radar Communication and Electromagnetic Stealth

ZHANG Ming^① WANG Zhe^① WANG Boya^① YANG Lin^① HAN Qi^①
HE Yuhang^① HOU Weimin^① LI Kang^②

^①(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology,
Shijiazhuang 050018, China)

^②(Faculty of Integrated Circuit, Xidian University, Xi'an 710003, China)

Abstract:

Objective To address the complexity and limited modulation of existing reconfigurable metasurfaces integrating radiation and stealth, this study proposes a single-layer space-time-coding metasurface that dynamically switches between beam scanning and RCS reduction. By periodically modulating meta-atom states in the time domain, the phase responses of incident and harmonic waves are differentiated, enabling dynamic integration of radiation and stealth without complex feeding networks or multilayer structures. The design achieves precise beam scanning and excellent RCS reduction, providing a simple, low-cost solution for integrating radar communication and electromagnetic stealth.

Methods This metasurface adopts a metal-dielectric-metal structure, with each meta-atom integrating a PIN diode. Electromagnetic simulations are conducted using CST Microwave Studio. At the optimal operating frequency, the meta-atom exhibits a 1-bit tunable reflection phase and a near-lossless co-polarized reflection amplitude. By feeding space-time-coding sequences into the metasurface model, dynamic control of beam scanning and RCS reduction is achieved. A prototype is fabricated using PCB technology, and its performance is validated through echo scattering measurements conducted with a vector network analyzer and a frequency offset option.

Results and Discussions Simulations and measurements confirm that the proposed space-time-coding metasurface enables precise beam steering and excellent RCS reduction. At 10.0 GHz, the meta-atoms provide a 180° reflection phase difference and near-lossless amplitude. In radiation mode, harmonic beams are steered to angles of +2°, +14°, +32°, +46°, -15°, -28°, and -44°, with side-lobe levels for the ± 3 rd to fundamental harmonics suppressed to -10.59 dB. In scattering mode, the RCS of the fundamental echo is reduced by 11.56 dB compared to a copper plate. Additionally, a -10 dB RCS reduction is achieved from 9.9 to 10.1 GHz, peaking at 14.83 dB at 9.95 GHz. Experimental results validate the design's integrated radiation-scattering capability and dynamic control flexibility.

Conclusions This study presents a design method for a space-time-coding metasurface that enables dynamically integrated manipulation of radiation and scattering. By employing meta-atoms integrated with PIN diodes, the proposed method periodically modulates the operating states of the meta-atoms on a single-layer metasurface to achieve differentiated distributions of the wavefront phases of various harmonics. The proposed scheme significantly reduces design complexity and manufacturing costs. The successful realization of beam scanning and RCS reduction highlights the great potential of this technology in the integrated design of radar communication and electromagnetic stealth.

Key words: Metasurface; space-time-coding sequence; beam scanning; RCS reduction