

时域数字编码超表面电磁散射频谱特征调控机理

许恒^{①②} 许红*^{①③} 全英汇*^{①②} 傅昊升^③
潘秦^{①②} 陈展野^{④⑤} 周小阳^{④⑤}

^①(西安电子科技大学信息力学与感知工程学院 西安 710071)

^②(西安市先进遥感重点实验室 西安 710071)

^③(西安电子科技大学杭州研究院 杭州 311200)

^④(东南大学毫米波全国重点实验室 南京 210096)

^⑤(东南大学电磁空间科学与技术研究院 南京 210096)

摘要: 时域数字编码超表面通过对单元散射状态进行时域编码调制, 可实现电磁散射频谱重构。该文研究有限时窗离散编码条件下随机和周期两类典型调制方式的散射频谱特性。对于随机调制, 推导了平均能量谱相干项与背景项分解的解析形式, 阐明了编码统计矩对零频分量抑制与谱展宽的影响。对于周期调制, 给出了调制模板傅里叶系数与各阶谐波能量分配之间的映射关系, 揭示了谐波能量重构机理。进一步结合超表面单元全波仿真参数, 讨论了非理想条件下散射频谱调控性能的变化。

关键词: 时域数字编码超表面; 频谱特征调控; 随机调制; 周期调制; 电磁散射

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-12

DOI: 10.12000/JR26001

CSTR: 32380.14.JR26001

引用格式: 许恒, 许红, 全英汇, 等. 时域数字编码超表面电磁散射频谱特征调控机理[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR26001.

Reference format: XU Heng, XU Hong, QUAN Yinghui, *et al.* Spectral control mechanisms of electromagnetic scattering via time-domain digital coding metasurfaces[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR26001.

Spectral Control Mechanisms of Electromagnetic Scattering via Time-Domain Digital Coding Metasurfaces

XU Heng^{①②} XU Hong*^{①③} QUAN Yinghui*^{①②} FU Haosheng^③ PAN Qin^{①②}
CHEN Zhanye^{④⑤} ZHOU Xiaoyang^{④⑤}

^①(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Xi'an Key Laboratory of Advanced Remote Sensing, Xi'an 710071, China)

^③(Hangzhou Institute of Technology, Xidian University., Hangzhou 311200, China)

^④(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^⑤(Institute of Electromagnetic Space, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Time-domain digital coding metasurfaces can reconstruct electromagnetic scattering spectra by temporally modulating the scattering states of constituent elements. This study investigates the scattering-spectrum characteristics of two typical modulation schemes, namely random modulation and periodic

收稿日期: 2026-01-04; 改回日期: ; 网络出版: 2026-xx-xx

*通信作者: 许红 xuhong@xidian.edu.cn; 全英汇 yhquan@mail.xidian.edu.cn

*Corresponding Authors: XU Hong xuhong@xidian.edu.cn; QUAN Yinghui, yhquan@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62331019)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62331019)

责任编辑: 程强 Corresponding Editor: CHENG Qiang

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

modulation, under finite-window discrete coding conditions. For random modulation, an analytical decomposition of the average energy spectrum into coherent and background terms is derived, and the effects of the statistical moments of the coding sequence on zero-frequency suppression and spectral spreading are clarified. For periodic modulation, the mapping between the Fourier coefficients of the modulation template and the energy allocation among harmonic orders is established, revealing the mechanism of harmonic energy reconstruction. Furthermore, incorporating full-wave simulated unit parameters enables analysis of performance variations in scattering-spectrum control under nonideal conditions.

Key words: Time-domain digital coding metasurfaces; Spectral characteristic control; Random modulation; Periodic modulation; Electromagnetic scattering

1 引言

电磁超表面能够对电磁波的幅度、相位与极化等特征进行灵活调控。随着数字编码超表面概念的提出,超表面的电磁响应与数字信息之间建立了映射关系^[1,2]。然而,早期相关研究主要集中于空间域静态编码,难以实现对电磁波频谱特性的灵活重构与调控。

为突破静态调控的限制,时域数字编码超表面将时间引入为新的调控自由度^[3,4]。通过在离散时间片内动态切换单元状态,从而在频域上产生谐波分量并实现能量分配。该调控机制为电磁频谱整形与能量重构提供了实现路径,并为无线通信^[5,6]、波束形成^[7,8]与通感一体^[9]等方向展现出应用潜力。

目前,围绕时域数字编码超表面的散射频谱调控特性,相关研究主要沿随机调制与周期调制两类典型机制展开。其中,随机调制主要利用时变参数的随机性实现频谱扩展与零频分量抑制;周期调制则主要通过周期编码序列实现对特定谐波分量的调控。

在随机调制方向,相关研究首先围绕散射谱展宽与频谱隐匿展开。澳大利亚国立大学Liu等人^[10]利用准随机时间序列获得类白噪声宽带散射谱,验证了时域超表面实现频谱隐匿的可行性。加拿大蒙特利尔理工学院Wang等人^[11-13]进一步提出选择性频谱扩展机制,并系统研究了伪随机时间调制超表面的工作原理与应用。除散射谱展宽外,随机调制对目标输出特征的影响也逐渐受到关注。东南大学周群焰等人^[14]提出超表面时序正交序列以形成雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)缩减效果,国防科技大学Wang等人^[15,16]、Liu等人^[18]以及中国科学技术大学Li等人^[17]分别将其用于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)与逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)特征破坏、成像遮盖和散射特征重塑等场景。近年来,西安电子科技大学Pan等人、Xiao等人^[19,20]开始从统计角度讨论随机相位调制下的谱分布规律及

其输出影响。空军工程大学Wang等人^[21]则指出简单随机调制在能量平坦性、残余峰值控制和能量利用效率等方面仍存在局限。总体来看,现有随机调制研究已经揭示了其在散射谱展宽和特征重塑方面的应用潜力,但对于有限时窗离散编码条件下散射谱能量分布的统一解析关系,以及不同随机编码体制之间调控能力的系统比较,仍有待进一步深入。

在周期调制方向,相关研究较早从时域超表面的谐波形成机理展开。东南大学Dai等人^[22]系统讨论了周期时变散射系数的频谱表达,以及幅度调制、相位调制和幅相联合调制对谐波分布的影响。在此基础上,东南大学Zhang等人^[23]进一步将周期时间编码拓展到时空联合调制框架,使谐波频谱分布与空间散射特性的协同调控关系得到更完整的阐释。随着相关理论不断丰富,东南大学Dai等人^[24,25]围绕非线性谐波生成、频率转换和谐波波束控制开展了研究,推动周期调制向特定谐波幅度、相位及空间分布的精细调控发展。与此同时,国防科技大学Wang等人^[26]将周期调制方法引入目标散射特征重构,通过相位开关屏和有源频率选择表面在高分辨距离像、SAR和ISAR图像中生成规则分布的假目标。南京理工大学Zhu等人、Fang等人^[27,28]、国防科技大学Liu等人^[29]又分别从多频时间调制、联合调制和频率分集等角度推进了这类方法的发展,使周期调制能够服务于更灵活的假目标构造、距离像调控和距离-多普勒特征重构。总体而言,现有周期调制研究已在谐波控制和目标特征重构方面形成了较为丰富的工作基础,但现有分析仍多围绕特定周期模板、特定编码形式或具体应用场景展开,对于有限时窗离散编码条件下谐波能量分配规律的统一解析,以及不同编码体制调控能力边界的系统比较,仍缺少面向散射频谱调控问题的专门讨论。

尽管上述研究已从散射谱展宽、谐波调控以及目标特征重构等方面展示了时域数字编码超表面的应用潜力,但现有分析多围绕特定编码形式或具体

任务展开。对于有限时窗离散编码条件下散射频谱能量分布的普遍规律，尤其是随机调制中编码统计特征与谱能量分布之间的联系、周期调制中模板结构与谐波能量分配之间的联系，仍缺少系统清晰的解析阐释。同时，实际超表面单元反射幅度和相位的频率依赖性及其对调控性能的影响，也有待进一步讨论。基于此，本文在已有时域超表面频谱理论基础，围绕有限时窗离散编码条件下的散射频谱调控问题，分别对随机调制和周期调制两类典型编码方式开展分析，并结合超表面单元全波仿真参数讨论非理想条件下的调控特性。主要工作如下：

第一，针对随机调制，推导了平均能量谱中相干项与背景项分解的解析形式，分析了编码统计矩与零频分量抑制及谱展宽之间的关系，并讨论了不同随机编码条件下能量扩散与零频抑制的变化规律。

第二，针对周期调制，给出了调制模板傅里叶系数与各阶谐波能量分配之间的映射关系，分析了有限时窗离散编码条件下的谐波能量重构特性，并讨论了不同周期编码方式下的谱能量分布差异。

第三，结合超表面单元全波仿真参数，分析了单元反射参数偏离理想条件时散射频谱调控性能的变化，并讨论了相关理论结果在非理想条件下的适用性。

2 时域数字编码超表面频谱调控模型

针对有限时窗离散编码条件下的散射频谱调控问题，本文考虑典型反射型超表面远场散射分量的时变响应。在给定入射方向、观测方向及极化条件下，超表面对该散射分量的作用可采用时变复散射系数进行等效表征。对于其他角度或极化通道，只需将对应通道的时变响应等效为相应的复散射系数，后续频谱调控分析框架仍可沿用，但各通道对应的状态参数一般并不相同。假设超表面的入射电磁波解析信号为 $x(t)$ ，在远场近似下，经超表面调制后的散射场信号 $y(t)$ 可表示为入射信号与时变复散射系数 $\Gamma(t)$ 的时域乘积。

$$y(t) = x(t)\Gamma(t) \quad (1)$$

根据数字编码超表面时间维度上的离散编码特性，连续的时间轴被离散化为若干个独立的编码时隙。设观测时间窗长度为 T ，将其均匀划分为 M 个时隙，每个时隙的持续宽度为 $T_c = T/M$ ，且在第 m 个时隙内 ($0 \leq m \leq M-1$)，超表面的电磁响应保持恒定状态。

令第 m 个时隙对应的复散射系数为 r_m ，则调制函数 $\Gamma(t)$ 可由一系列时移的门控脉冲线性叠加表示为

$$\Gamma(t) = \sum_{m=0}^{M-1} r_m g(t - mT_c) \quad (2)$$

其中， $g(\cdot)$ 为定义在单一时隙内的单位门控函数。

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

为了解析超表面编码调制对频域能量分布的影响效应，将散射场频谱 $Y(f)$ 表示为入射波频谱 $X(f)$ 与调制函数频谱 $\Gamma(f)$ 的线性卷积。

$$Y(f) = \Gamma(f) * X(f) \quad (4)$$

式(4)表明，散射场频谱由入射信号频谱与调制函数频谱共同决定。为分析时域编码对频域能量分布的影响，进一步对调制函数进行频域展开，可得

$$\begin{aligned} \Gamma(f) &= G(f) \sum_{m=0}^{M-1} r_m e^{-j2\pi f m T_c} \\ &= \underbrace{T_c \text{sinc}(f T_c)}_{\text{外层包络项}} e^{-j\pi f T_c} \underbrace{\sum_{m=0}^{M-1} r_m e^{-j2\pi f m T_c}}_{\text{内层结构项}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $G(f)$ 为门控函数 $g(t)$ 的频谱。式(5)给出了有限时窗离散编码条件下调制函数的统一频域表示，其频谱结构可分为两部分：(1)外层包络项由时隙宽度 T_c 决定，其表现为全频段的 sinc 函数包络，其零点带宽为 $1/T_c$ ；(2)内层结构项由散射系数调制序列 $\{r_m\}$ 决定，对应编码序列的离散时间傅里叶变换，决定了在 sinc 包络下的能量分布。基于此，后文将分别从随机调制和周期调制两种典型情形出发，讨论不同编码约束下的散射频谱调控特性。

3 超表面随机调制频谱特性

基于第2节给出的调制函数频域表达，当超表面单元的调制序列 $\{r_m\}$ 按照特定的概率分布进行随机时变切换时，其频域响应不再对应单一确定的谱分布，而应在统计意义下进行平均能量谱分析。

3.1 随机调制的平均能量谱

假设各时隙的散射系数 r_m 为独立同分布的复随机变量。为了量化编码序列的统计特性，定义其一阶矩为 $\mu = E[r_m]$ ，二阶原点矩为 $P = E[|r_m|^2]$ 。

调制函数的统计平均能量谱可以计算为

$$\begin{aligned} E[|\Gamma(f)|^2] &= E\left[|G(f)|^2 \sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{K-1} r_m r_n^* e^{-j2\pi f T_c(m-n)}\right] \\ &= |G(f)|^2 \sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{K-1} E[r_m r_n^*] e^{-j2\pi f T_c(m-n)} \end{aligned} \quad (6)$$

利用序列的独立同分布性质, 相关函数 $E[r_m r_n^*]$ 具有如下统计特征: 当 $m = n$ 时, $E[r_m r_n^*] = P$; 当 $m \neq n$ 时, $E[r_m r_n^*] = E[r_m] E[r_n^*] = |\mu|^2$ 。代入式(6)并化简, 可得随机调制下的平均能量谱解析式:

$$\begin{aligned} & E[|\Gamma(f)|^2] \\ &= |G(f)|^2 \left(\sum_{\substack{m,n=0 \\ m=n}}^{K-1} P + \sum_{\substack{m,n=0 \\ m \neq n}}^{K-1} |\mu|^2 e^{-j2\pi f T_c(m-n)} \right) \\ &= |G(f)|^2 \left[\sum_{\substack{m,n=0 \\ m=n}}^{K-1} P + |\mu|^2 \left(\sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{K-1} e^{-j2\pi f T_c(m-n)} - \sum_{\substack{m,n=0 \\ m=n}}^{K-1} e^{-j2\pi f T_c(m-n)} \right) \right] \\ &= |G(f)|^2 \left[\underbrace{M(P - |\mu|^2)}_{\text{非相干背景项}} + \underbrace{|\mu|^2 \left| \frac{\sin(\pi f M T_c)}{\sin(\pi f T_c)} \right|^2}_{\text{相干结构项}} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)表明, 调制函数能量谱被分解为两部分: (1)非相干背景项, 不包含频率干涉因子, 呈现平坦的类噪声分布, 是实现能量由窄带向宽带扩散的主要来源; (2)相干结构项, 包含阵列因子 $|S_M(f)|^2 = |\sin(\pi f M T_c) / \sin(\pi f T_c)|^2$, 且由于 $|S_M(f)|^2$ 表现为周期性的梳状谱, 该项直接对应频谱中残留的直流分量或高能量离散谱峰。由式(7)可见, 统计矩 μ 和 P 是决定频谱形态的关键参数。若要实现离散谱峰的有效抑制, 需要削弱相干结构项, 即要求编码序列的一阶矩满足零均值条件。在该条件下, 频谱能量主要由背景项决定。上述平均能量谱中相干项与背景项相互转化的示意图如图1所示。

3.2 随机幅度调制频谱特性

假设采用1-bit幅度调制, 散射系数 r_m 在两个非负状态 $\{a_0, a_1\}$ 之间切换, 设 $a_1 > a_0 \geq 0$ 。若每个时隙的状态服从伯努利分布, 取 a_0 的概率为 p , 取 a_1 的概率为 $1-p$ 。则该编码序列的一阶矩 μ 与二阶矩 P 分别为

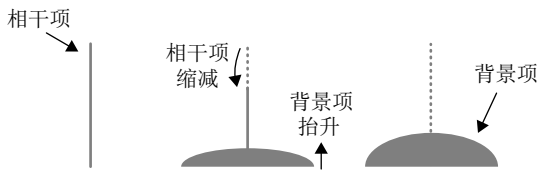


图1 随机调制平均能量谱的相干项与背景项转化示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the coherent and background components in the average energy spectrum under random modulation

$$\begin{cases} \mu = p a_0 + (1-p) a_1 \\ P = p a_0^2 + (1-p) a_1^2 \end{cases} \quad (8)$$

为了定量分析频谱中相干项的相对强度, 定义相干能量因子 $\gamma = |\mu|^2 / P$, 其物理含义为相干结构项在总能量中的占比。令调制幅度比为 $\eta = a_0 / a_1 \in [0, 1)$, 可得

$$\gamma = \frac{[p\eta + (1-p)]^2}{p\eta^2 + (1-p)} \quad (9)$$

将该式对 η 求导可知, 在给定 p 的情况下, γ 随 η 单调递增。这表明, 随机幅度调制受幅度非负约束限制, 即使在等概率条件下相干能量因子仍存在下界, 因此频谱中不可避免地保留显著相干结构项, 难以实现理想的宽带类噪声扩散。

进一步考虑多bit等间隔随机幅度调制情形, 即多个散射状态的幅度满足等差关系, 且各状态服从等概率分布, 假设共有 K 个散射状态, 则相干能量因子极限值为

$$\gamma = \frac{3(K-1)}{2(2K-1)} \quad (10)$$

当 K 趋于无穷大时, γ 极限值为0.75。结果表明, 随着量化精度提高, 相干项能量占比并不会减小, 反而呈上升趋势, 即增加幅度量化bit数并不能改善随机幅度调制的扩谱能力。因此, 仅靠幅度随机化无法实现理想的宽带类噪声谱。

3.3 随机相位调制频谱特性

假设超表面采用1-bit相位编码, 散射系数 r_m 在两个单位模长的复数状态 $\{e^{j\varphi_0}, e^{j\varphi_1}\}$ 之间切换。设相位差为 $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1 \in [0, 2\pi)$, 且两个状态服从伯努利分布, 取 $e^{j\varphi_0}$ 的概率为 p , 取 $e^{j\varphi_1}$ 的概率为 $1-p$ 。由于模长恒定, 该编码序列的一阶矩 μ 与二阶矩 P 分别为

$$\begin{cases} \mu = p e^{j\varphi_0} + (1-p) e^{j\varphi_1} \\ P = 1 \end{cases} \quad (11)$$

利用欧拉公式, 相干能量因子可以计算为

$$\begin{aligned} \gamma &= |p e^{j\varphi_0} + (1-p) e^{j\varphi_1}|^2 \\ &= 1 - 4p(1-p) \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

通过极值分析可知, 当且仅当 $\Delta\varphi = \pi$, $p = 0.5$ 时, 相干能量因子取到最小值为零。此时频谱中的相干结构项被抑制, 能量主要分布于背景项, 从而实现有效抑制和更显著的谱展宽。因此, 随机相位调制在频谱扩展能力上更具优势。

4 超表面周期调制频谱特性

随机编码主要对应连续背景能量分布，而周期编码则在频域上表现出规则分布的谐波结构。本节在周期约束条件下讨论有限时窗离散编码的谱重构特性，并进一步分析周期模板与各阶谐波能量分配之间的关系。

4.1 周期调制的谐波模型

假设超表面的散射系数序列 $\{r_m\}$ 以长度 L 为周期重复排列，即满足 $r_m = r_{m \bmod L}$ 。此时，总观测时间内的编码序列可视为一个基本周期模板 $\{c_0, c_1, \dots, c_{L-1}\}$ 在时域上的 Q 次重复。

根据式(5)，可进一步得到周期调制函数的频域表达式

$$\begin{aligned} \Gamma(f) &= G(f) \sum_{m=0}^{M-1} r_m e^{-j2\pi f T_c m} \\ &= G(f) \sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{l=0}^{L-1} c_l e^{-j2\pi f T_c (l+qL)} \\ &= G(f) \underbrace{\left(\sum_{l=0}^{L-1} c_l e^{-j2\pi f T_c l} \right)}_{A_L(f)} \underbrace{\left(\sum_{q=0}^{Q-1} e^{-j2\pi f T_c qL} \right)}_{S_Q(f)} \end{aligned} \quad (13)$$

其中， $A_L(f)$ 表示周期模板加权因子， $S_Q(f)$ 表示梳状谱因子。根据式(13)，周期调制频谱的结构可分为3个部分：(1)外层包络；(2)模板加权因子，对应单周期模板序列的离散时间傅里叶变换，用于表征各谐波分量的相对幅度和相位权重；(3)梳状谱因子，由周期重复次数 Q 决定，当 Q 足够大时，该因子表现为一系列等间隔离散谱峰，各谱峰中心频点为 $f_i = i/(LT_c)$ ， i 为整数。上述周期调制频谱层次结构示意图如图2所示。

为了更清晰地刻画谱能量的层次结构，将谱峰中心 f_i 重写为两级索引形式。

$$f_{n,l} = \frac{n}{T_c} + \frac{l}{LT_c} \quad (14)$$

其中， n 表示粗粒度的谐波簇索引， l 表示细粒度的簇内谱峰索引。在此定义下，频谱被划分为若干个以 $1/T_c$ 为间隔的谐波簇。每个簇内包含 L 个谱峰，其能量权重由模板因子 $A_L(f)$ 在对应频点的值决定。由于 $A_L(f)$ 是以 $1/T_c$ 为周期的函数，这意味着不同谐波簇具有相似的内部精细结构，对于给定的簇内索引 l ，对于任意 n ， $A_L(f_{n,l})$ 取值相同，记为 $A_L[l]$ ，即视为各谐波簇内第 l 个谱峰对应的共同权重，但受到外层包络 $G(f)$ 的幅度加权。

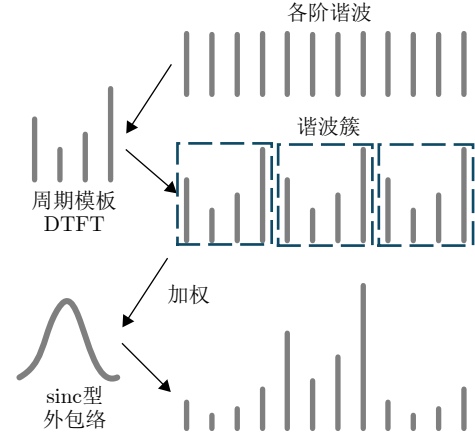


图 2 周期调制频谱层次结构示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the hierarchical spectral structure under periodic modulation

4.2 1-bit 周期幅度调制频谱特性

1-bit 周期幅度调制采用长度为 $L = 2$ 的周期模板 $\{a_0, a_1\}$ 对超表面散射系数进行编码，其频谱特征由模板的离散傅里叶系数与时隙外包络共同决定。

编码序列的平均功率为 $P = 1/2 (a_0^2 + a_1^2)$ ，当取 $f = l/(2T_c)$ ， $l \in \{0, 1\}$ 时，周期内能量谱取到对应谐波簇峰值。

$$\begin{cases} |A_L[0]|^2 = \frac{(a_0 + a_1)^2}{P} \\ |A_L[1]|^2 = \frac{(a_0 - a_1)^2}{P} \end{cases} \quad (15)$$

由于调制幅度非负，直流项能量始终存在且通常占据主导地位。

结合梳状谱因子与外层包络，周期调制在频域形成间隔为 $1/(2T_c)$ 的离散谱峰。然而，根据 sinc 函数的零点分布特性，其零点位于 $f = i/T_c$ (i 为不为零的整数)。此时，偶次谐波簇中心与外层 sinc 包络零点重合，除零频直流分量外，其余高阶偶次谐波均被显著抑制。因而，1-bit 周期幅度调制的频谱呈现“强直流+奇次谐波”特征；同时，由于调制序列为实数，频谱关于零频保持偶对称，难以实现单边带能量传输。

4.3 2-bit 周期幅度调制频谱特性

为进一步提升频谱调控的自由度，2-bit 周期幅度调制引入了4个非负的反射状态，其周期模板为 $\{a_0, a_1, a_2, a_3\}$ ，此时 $L = 4$ 。相比于1-bit 调制仅能控制基波强度，2-bit 调制通过增加时域编码的自由度，使不同谐波的能量分配具备更灵活的调节能力。

设编码序列的平均功率为 $P = 1/4 (a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)$ 。基于离散傅里叶变换, 各阶谐波簇能量谱权重可解析为

$$\begin{cases} |A_L [0]|^2 = \frac{(a_0 + a_1 + a_2 + a_3)^2}{P} \\ |A_L [1]|^2 = \frac{[(a_0 - a_2)^2 + (a_1 - a_3)^2]}{P} \\ |A_L [2]|^2 = \frac{(a_0 - a_1 + a_2 - a_3)^2}{P} \\ |A_L [3]|^2 = \frac{[(a_0 - a_2)^2 + (a_1 - a_3)^2]}{P} \end{cases} \quad (16)$$

与1-bit幅度调制相比, 2-bit周期幅度调制具有更高的谐波调控自由度, 能够通过各状态幅度之间的代数关系对特定谐波分量进行抑制。当满足 $a_0 = a_2$ 且 $a_1 = a_3$ 时, 周期序列退化为1-bit; 当满足 $a_0 + a_2 = a_1 + a_3$ 时, $l = 2$ 的等间隔谐波集合被置零, 此时能量仅分布在直流和基波上。由此可见, 2-bit幅度调制虽然提高了谐波能量分配的灵活性, 但由于散射系数仍受实数域约束, 直流分量无法消除, 且频谱保持偶对称。

4.4 1-bit周期相位调制频谱特性

相较于幅度调制存在的直流残留和能量损耗问题, 相位调制利用复数域恒模特性, 可在保持反射效率的前提下实现电磁能量的重新分配。

假设1-bit周期相位调制采用 $L = 2$ 的周期模板 $\{e^{j\varphi_0}, e^{j\varphi_1}\}$ 其中相位状态 $\varphi_0, \varphi_1 \in [0, 2\pi)$, 相位差为 $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1$, 其平均功率恒为 $P = 1$ 。则谐波簇内各离散频点的能量权重为

$$\begin{cases} |A_L [0]|^2 = 4\cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \\ |A_L [1]|^2 = 4\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \end{cases} \quad (17)$$

式(17)表明, 1-bit相位调制本质上是在零频分量与一阶谐波之间进行能量互补分配。随着相位差 $\Delta\varphi$ 从0增加到 π , 能量逐渐从直流向基波转移。当 $\Delta\varphi = \pi$ 时, 零频分量被抑制, 能量转移到一阶谐波位置。需要指出的是, 1-bit相位调制对应的散射系数仍为实数, 因而频谱保持偶对称, 若要进一步实现非对称谐波调控, 则需引入2-bit相位调制所提供的复数域自由度。

4.5 2-bit周期相位调制频谱特性

为了彻底突破实数序列带来的频谱对称性限制, 2-bit周期相位调制引入了4个相位状态, 构建了一个完整的复平面信号星座图, 其周期模板为 $\{e^{j\varphi_0}, e^{j\varphi_1}, e^{j\varphi_2}, e^{j\varphi_3}\}$, 此时 $L = 4$ 。

令 $\psi_0 = (\varphi_0 + \varphi_2)/2$, $\psi_1 = (\varphi_1 + \varphi_3)/2$, $\Delta_0 = (\varphi_0 - \varphi_2)/2$, $\Delta_1 = (\varphi_1 - \varphi_3)/2$, $\Psi = \psi_0 - \psi_1$ 。当取 $f = l/(4T_c)$, $l \in \{0, 1, 2, 3\}$ 时, 利用欧拉公式可得到周期内能量谱取到对应谐波簇峰值

$$\begin{cases} |A_L [0]|^2 = |e^{j\phi_0} + e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2} + e^{j\phi_3}|^2 \\ = 4|\cos \Delta_0 + \cos \Delta_1 e^{j\Psi}|^2 \\ |A_L [1]|^2 = |e^{j\phi_0} - j e^{j\phi_1} - e^{j\phi_2} + j e^{j\phi_3}|^2 \\ = 4|\sin \Delta_1 e^{j\Psi} - \sin \Delta_0 e^{j\frac{\pi}{2}}|^2 \\ |A_L [2]|^2 = |e^{j\phi_0} - e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2} - e^{j\phi_3}|^2 \\ = 4|\cos \Delta_0 - \cos \Delta_1 e^{j\Psi}|^2 \\ |A_L [3]|^2 = |e^{j\phi_0} + j e^{j\phi_1} - e^{j\phi_2} - j e^{j\phi_3}|^2 \\ = 4|\sin \Delta_1 e^{j\Psi} + \sin \Delta_0 e^{j\frac{\pi}{2}}|^2 \end{cases} \quad (18)$$

可以看出, 周期内能量谱的各谐波簇峰值满足总能量守恒, 与周期模板的相位取值无关。下面提供一组可行的方案。当 $\Delta_0 = \Delta_1 = \pi/2$, $\Psi = -\pi/2$ 时, 能量集中在 $f_{n,1}$; 当 $\Delta_0 = \Delta_1 = 0$, $\Psi = \pi$ (1-bit调制) 时, 能量集中在 $f_{n,2}$; 当 $\Delta_0 = \Delta_1 = \pi/2$, $\Psi = \pi/2$ 时, 能量集中在 $f_{n,3}$ 。

综上, 2-bit周期相位调制能够突破1-bit相位调制的对称结构限制, 实现对目标谐波能量的更精细控制。对于更一般的周期模板情形, 仍可沿用上述分解思路开展分析, 本文不再展开讨论。

5 典型参数仿真验证

本节首先采用蒙特卡罗仿真对前文随机调制与周期调制的解析结果进行数值验证。进一步地, 结合超表面单元全波仿真参数, 讨论频率相关非理想幅相条件下的散射频谱调控特性。仿真参数设置如下: 观测时间窗 T 为 $20 \mu\text{s}$, 时隙宽度 T_c 为 100 ns , 即总时隙数 M 为 200 , 1-bit和2-bit幅度调制的散射系数取值分别为 $\{0, 1\}$ 和 $\{0, 1, 2, 3\}$, 1-bit和2-bit相位调制的相位状态取值分别为 $\{0, \pi\}$ 和 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ 。所有曲线均相对无调制主瓣峰值进行数值归一化。

5.1 随机调制下的频谱扩散验证

图3展示了1-bit随机幅度调制与1-bit随机相位调制下的归一化平均能量谱对比结果。仿真中随机编码序列长度为 200 , 各时隙状态相互独立, 且两种状态均按等概率取值; 图中实线为 1000 次独立实验的蒙特卡洛仿真结果, 虚线为理论值。可以看出, 仿真结果与理论结果在全频段内吻合良好。对于1-bit随机幅度调制, 零频处仍保留 -2.99 dB 的相干分量; 相比之下, 1-bit随机相位调制可显著抑制零频残留, 其背景能量约为 -23.01 dB , 说明随机相位调制更有利于削弱相干结构项并实现谱展宽。

图4进一步比较了1-bit和2-bit随机幅度调制下的归一化平均能量谱，实线为蒙特卡罗仿真结果，虚线为理论值。可以看出，两组结果均与理论分析吻合。对应地，1-bit和2-bit随机幅度调制的相干能量因子分别为0.5和0.64，相干项峰值由-2.99 dB升高至-1.91 dB，而背景项能量则由-26.02 dB下降

至-27.48 dB。这表明随着幅度量化电平数增加，相干项向背景项的能量转移反而受到抑制，从而不利于实现更强的频谱扩散。

5.2 周期调制下的谐波重构验证

图5展示了1-bit和2-bit周期调制下调制函数的

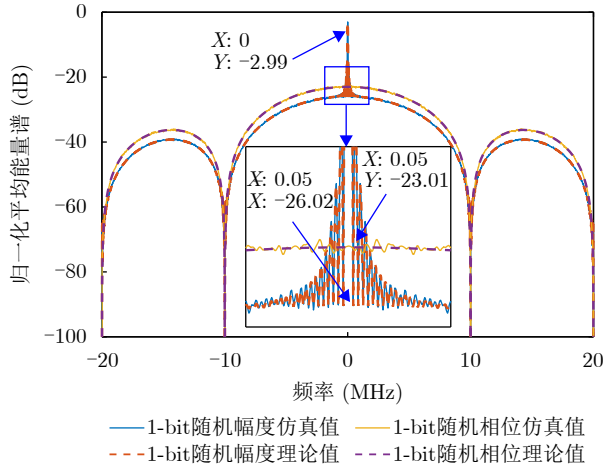


图 3 1-bit随机幅度调制和1-bit随机相位调制下调制函数平均能量谱

Fig. 3 Average energy spectrum of the modulation function under 1-bit random amplitude modulation and 1-bit random phase modulation

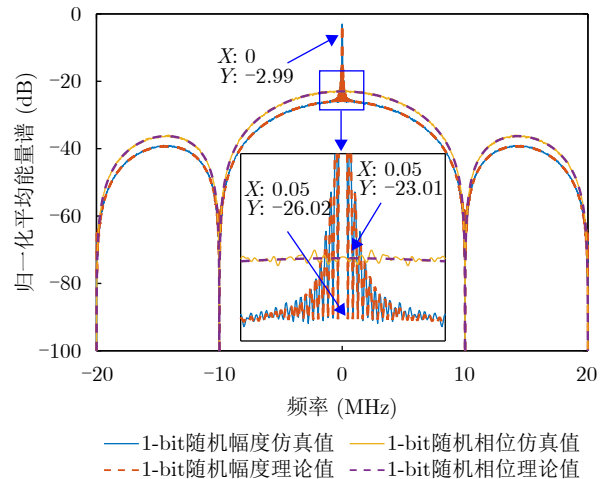
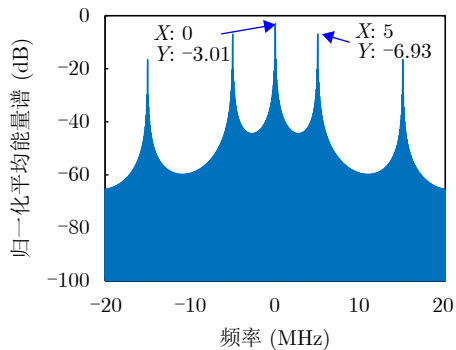
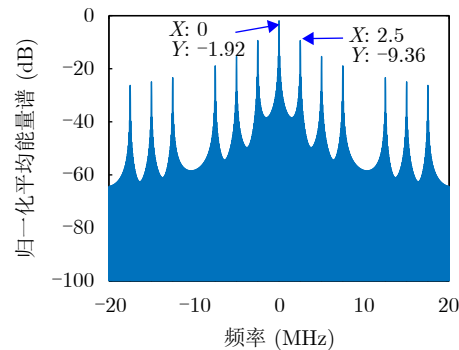


图 4 1-bit和2-bit随机幅度调制下调制函数平均能量谱

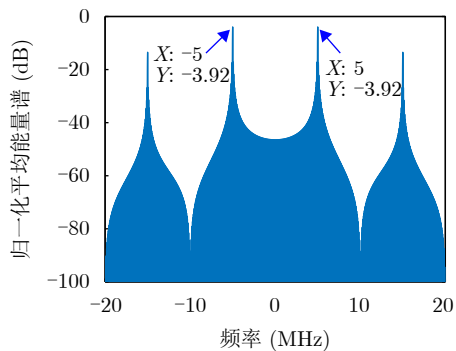
Fig. 4 Average energy spectrum of the modulation function under 1-bit and 2-bit random amplitude modulation



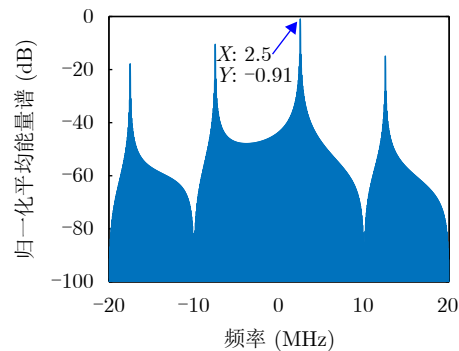
(a) 1-bit周期幅度调制
(a) 1-bit periodic amplitude modulation



(b) 2-bit周期幅度调制
(b) 2-bit periodic amplitude modulation



(c) 1-bit周期相位调制
(c) 1-bit periodic phase modulation



(d) 2-bit周期相位调制
(d) 2-bit periodic phase modulation

图 5 1-bit和2-bit周期调制下调制函数平均能量谱

Fig. 5 Average energy spectrum of the modulation function under 1-bit and 2-bit periodic modulation

平均能量谱。可以看出,不同曲线之间的差异主要由周期模板的傅里叶系数决定。图5(a)所示1-bit周期幅度调制表现为“强直流+奇次谐波”结构,零频处谱峰能量为 -3.01 dB;图5(b)所示2-bit周期幅度调制在保留较强直流分量的同时出现更丰富的谐波谱峰。图5(c)和图5(d)分别给出了1-bit和2-bit周期相位调制结果,其中1-bit相位调制能够抑制零频分量并在一阶谐波处形成 -3.92 dB的谱峰,而2-bit相位调制进一步实现了目标谐波能量集中,对应谱峰能量约为 -0.91 dB。上述结果与第4节关于周期模板傅里叶系数决定谐波能量分配的分析一致。

5.3 非理想相位差下随机相位调制的相干/背景能量分解验证

本节从参数化角度验证非理想相位差条件下随机相位调制的相干项与背景项分解规律。如图6所示,在3组相位差条件下,总平均能量谱峰值分别为 -5.95 dB, -2.99 dB和 -1.24 dB,而相干项峰值分别为 -6.02 dB, -3.01 dB和 -1.25 dB,二者基本一致,表

明谱峰附近的能量主要由相干结构项决定。与此同时,背景项在零频处的能量水平分别为 -24.14 dB, -25.68 dB和 -28.95 dB。随着相位差偏离理想反相条件,相干项峰值明显抬升,而背景项能量同步下降,说明在总能量基本守恒的条件下,能量由扩散型背景向集中型相干分量转移。上述结果表明,随机相位调制实现理想谱扩散的关键在于满足近似零均值条件;当相位差偏离理想状态时,相干项残留将显著削弱零频分量抑制和频谱噪声化能力。

5.4 非理想相位差下周期相位调制的谐波峰值能量验证

本节从参数化角度验证非理想相位差条件下周期相位调制的谐波能量变化规律。图7给出了2-bit调制下3组相位差参数条件的仿真值与理论值结果,其中仿真值通过对调制序列进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)获得,理论值由第4节公式计算得到。可以看出,3组参数下仿真谱峰位置均与理论谐波频点严格对齐,且各峰值能量

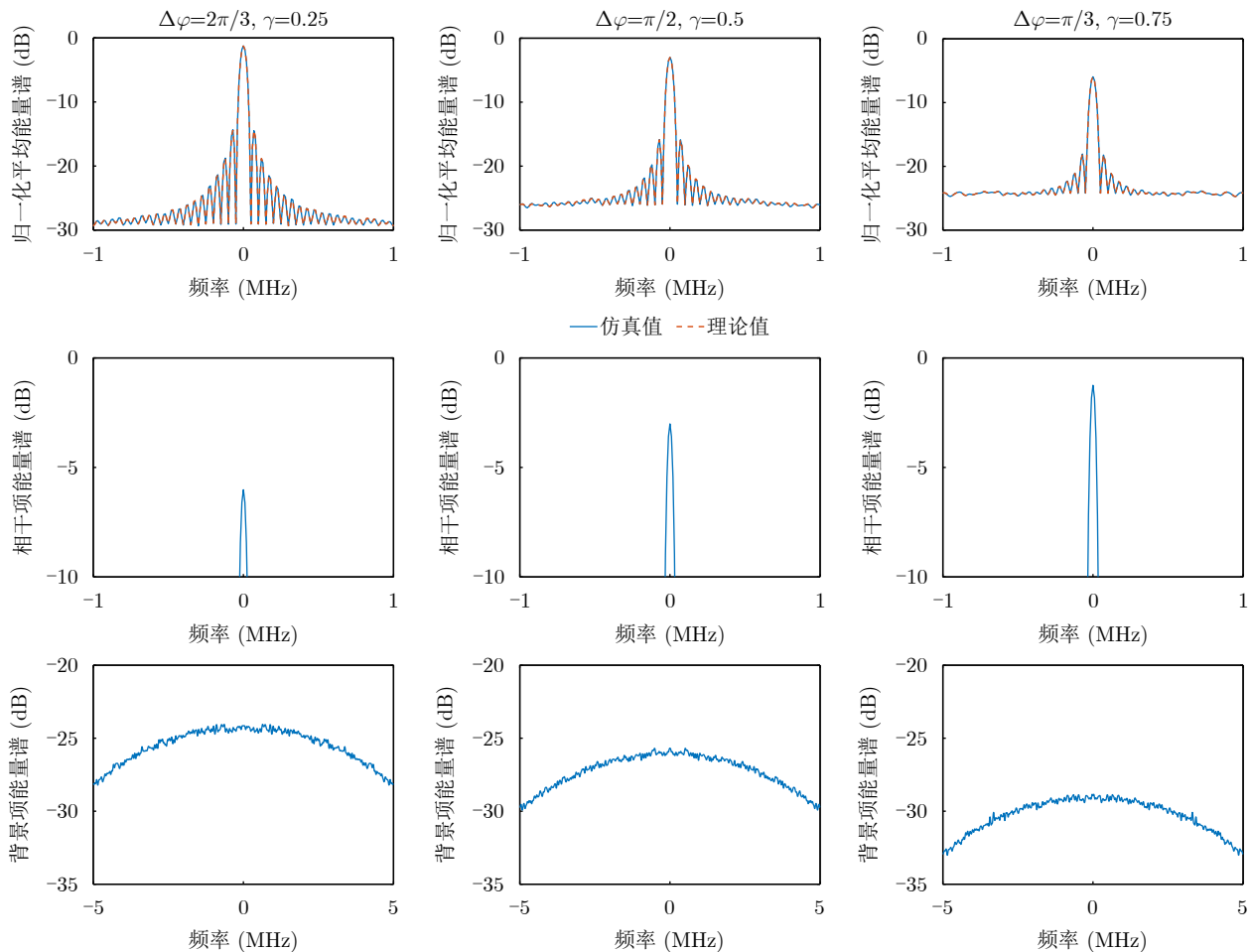


图6 1-bit非理想随机相位调制下的平均能量谱分解

Fig. 6 Decomposition of the average energy spectrum under 1-bit nonideal random phase modulation

与理论结果保持一致，说明谐波能量分配由周期模板的傅里叶系数决定。随着相位差偏离理想条件，原本受抑制的谐波分量逐渐出现泄漏并被抬升，谱峰数量增多、能量分布趋于分散，从而削弱了目标谐波的能量汇聚能力和频移效率。

5.5 基于全波参数的超表面调控频谱特性验证

超表面单元两离散状态的反射幅度和相位通常随频率变化，这将直接影响随机调制的直流抑制能力和周期调制的谐波能量重构能力。为此，本节进一步结合超表面单元的全波仿真参数，对频率相关非理想条件下的散射频谱调控特性进行验证。

为获得超表面单元的状态参数，本文选取反射型1-bit相位调制超表面单元进行全波仿真。图8(a)给出了该单元的结构示意，其周期尺寸为15 mm × 15 mm，顶部辐射贴片为U形金属结构，外尺寸为11 mm × 7.5 mm，线宽为0.8 mm，内孔尺寸为5.4 mm × 5.6 mm。该单元采用多层反射型结构，由顶层金属贴片、F4BM265介质基板、RO4450F半固化片以及底部RO4350介质基板和相位调制微带电路组成。图8(b)为单元等效电路，其中M1和M2表示两段长度不同的阻抗渐变微带线，C1和C2为4.7 pF隔直电容，D1和D2为PIN二极管；二极管在关断和导通状态下分别采用串联L-C和串联L-

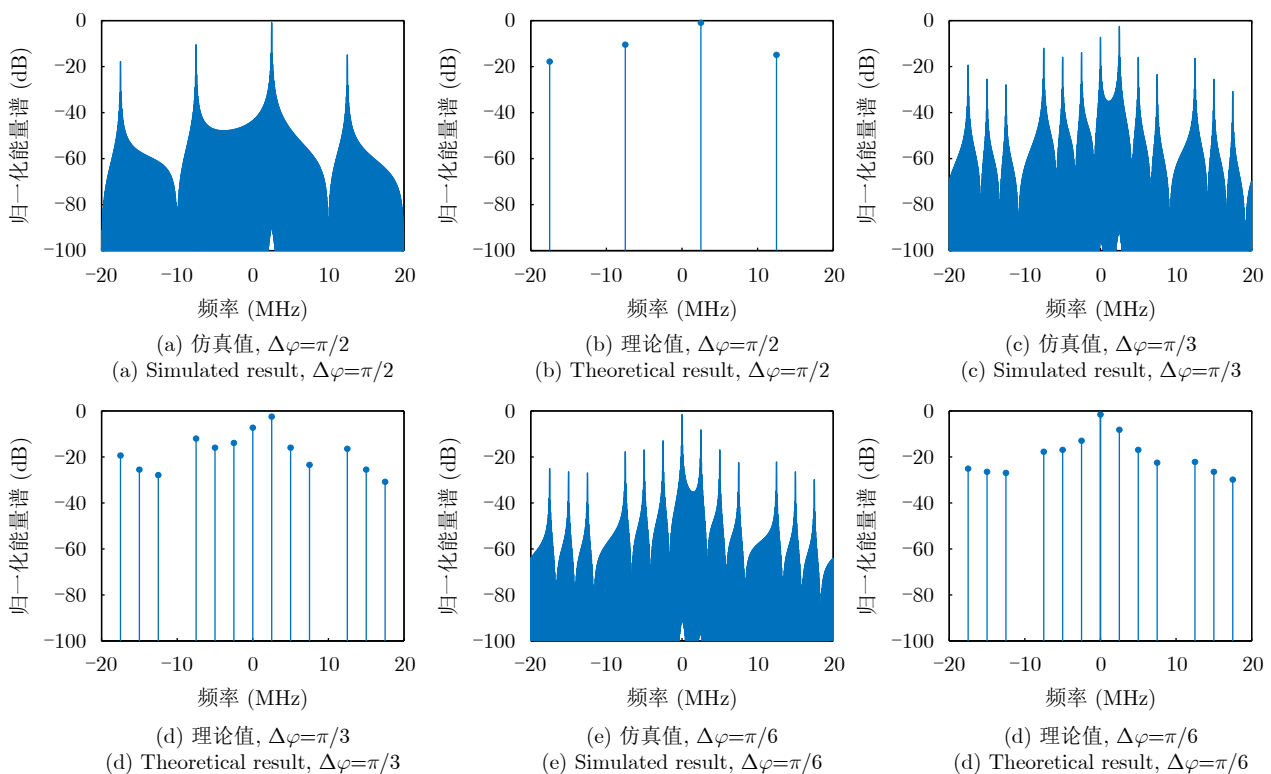


图 7 2-bit非理想周期相位调制下的平均谱能量分解

Fig. 7 Comparison of simulated and theoretical average spectral energy under 2-bit nonideal periodic phase modulation

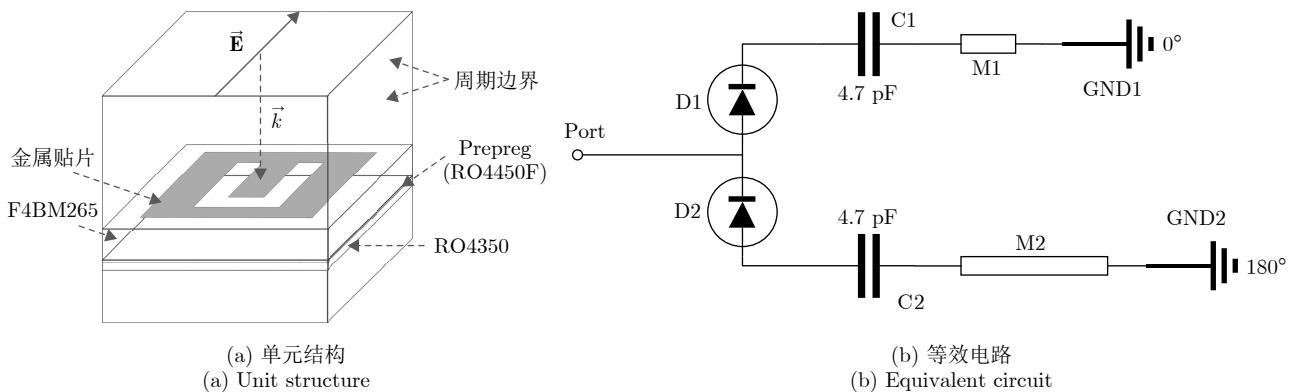


图 8 超表面单元结构及等效电路图

Fig. 8 Structure and equivalent circuit of the 1-bit phase-modulated metasurface unit

R等效模型, 其中 $L=25\text{ pH}$, $C=0.025\text{ pF}$, $R=5.2\Omega$ 。在ANSYS HFSS软件中, 对该单元施加周期边界条件, 并在顶部设置Floquet端口激励法向入射的y极化平面波。基于该模型提取两个离散状态下的反射幅度和相位参数, 用于后续频谱调控性能分析。

图9给出了两个离散状态下反射幅度、反射相位以及状态间幅度比和相位差随频率的变化结果。可以看出, 在阴影标示的工作频段9.0~10.0 GHz内, 两状态反射幅度整体接近, 幅度比基本维持在 $\pm 1\text{ dB}$ 范围内; 相位差分布在 $160^\circ\sim 205^\circ$ 。随着频率偏离该区间, 两状态幅度失衡和相位偏差均明显增大, 表明实际单元仅在该频带内较好满足前文分析所需的状态条件, 而带外则表现出显著的频率依赖性。

图10给出了将实际单元参数代入前文模型后的频谱调控结果。对于随机调制, 工作频带内直流分量整体可压低至 -14 dB 以下, 最深抑制约为 -23 dB ; 当频率偏离该频带后, 直流抑制能力明显退化。对于周期调制, 在工作频带内, 目标+1阶谐波峰值约为 -6 dB , 同时直流泄漏整体低于 -14 dB ; 当频

率偏离该频带后, 目标谐波能量下降而直流泄漏升高。上述结果表明, 前文关于随机调制频谱展宽效应和周期调制谐波调控特性的理论分析在超表面工作频带内具有较好的适用性, 其可实现的调控性能受单元频率色散特性的制约。

6 结语

本文围绕时域数字编码超表面在有限时窗离散编码条件下的散射频谱调控问题, 分别分析了随机调制和周期调制两类典型编码方式的谱特性, 并结合超表面单元全波仿真参数讨论了非理想条件下的调控性能。主要结论如下:

(1) 针对随机调制, 本文给出了平均能量谱中相干项与背景项的解析分解, 明确了编码统计矩与零频分量抑制、谱展宽之间的定量联系。结果表明, 随机相位调制更易削弱相干结构项, 实现能量扩散; 随机幅度调制则受幅度非负约束限制, 通常保留残余相干谱峰。

(2) 针对周期调制, 本文给出了调制模板傅里叶系数与各阶谐波能量分配之间的映射关系, 揭示

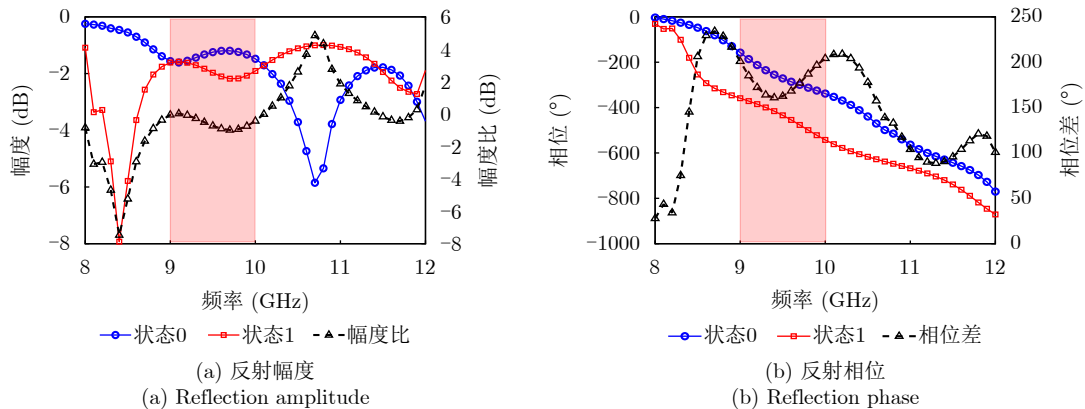


图9 超表面单元状态参数

Fig. 9 State parameters of the metasurface unit

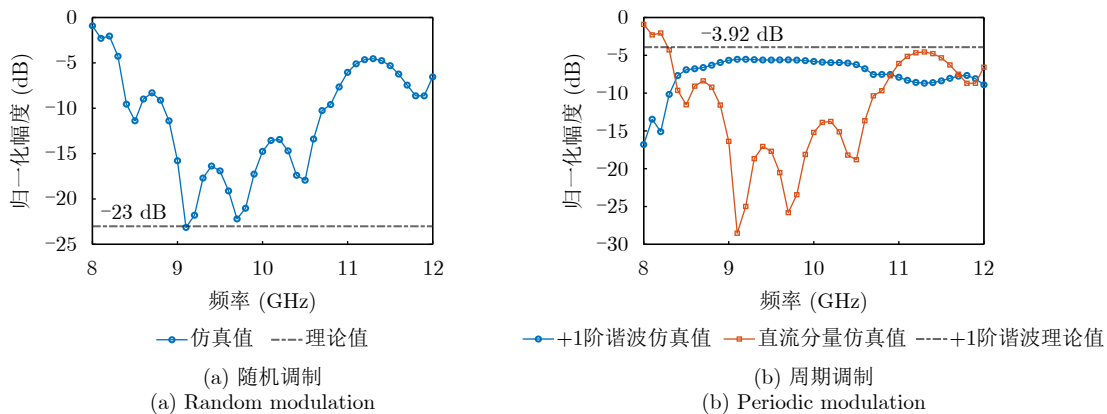


图10 基于全波参数的散射频谱调控性能

Fig. 10 Scattering-spectrum control performance based on full-wave parameters

了有限时窗离散编码条件下的谐波能量重构机理。结果表明，实数域周期编码倾向形成对称谱分布，而复数相位编码更有利于实现目标谐波能量聚集。

(3) 结合实际超表面单元反射参数的频率依赖性分析，本文进一步说明了前述理论结果的适用边界。工作频带内，两离散状态的幅相条件较接近理想值，随机调制的零频分量抑制和周期调制的谐波调控效果与理论分析较为一致；偏离该频带后，状态间幅相失配增大，调控性能均出现明显退化。

需要指出的是，本文主要从稳态等效散射参数角度分析了时域数字编码超表面的散射频谱调控规律。实际系统中，在较高调制速率下，器件有限开关速度及由此引起的上升沿、下降沿非理想，以及寄生电容/电感/电阻和材料色散等因素，都会改变超表面时变等效散射系数的幅相特性，从而使实际频谱调控结果偏离理想效果。在应用层面，本文揭示的随机扩谱与周期谐波重构规律，可为通信场景中的频谱整形与调制设计，以及雷达场景中的回波特征重塑、假目标构造和散射特征调控提供理论参考。后续工作可在此基础上结合更一般的角度、极化及具体任务需求，进一步讨论时域编码超表面的工程实现问题。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

- [1] 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).
- [2] 蒋卫祥, 田翰闾, 宋超, 等. 数字编码超表面: 迈向电磁功能的可编程与智能调控[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 1003–1019. doi: [10.12000/JR22167](https://doi.org/10.12000/JR22167).
JIANG Weixiang, TIAN Hanwei, SONG Chao, *et al.* Digital coding metasurfaces: Toward programmable and smart manipulations of electromagnetic functions[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1003–1019. doi: [10.12000/JR22167](https://doi.org/10.12000/JR22167).
- [3] 戴俊彦. 时域超表面理论研究与应用[D]. [博士学位论文], 东南大学, 2019. doi: [10.27014/d.cnki.gdnau.2019.004066](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2019.004066).
DAI Junyan. Research and application of time-domain metasurface[D]. [Ph.D. dissertation], Southeast University, 2019. doi: [10.27014/d.cnki.gdnau.2019.004066](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2019.004066).
- [4] ZHANG Lei, CHEN Xiaoqing, LIU Shuo, *et al.* Space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4334. doi: [10.1038/s41467-018-06802-0](https://doi.org/10.1038/s41467-018-06802-0).
- [5] TANG Wankai, LI Xiang, DAI Junyan, *et al.* Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results[J]. *China Communications*, 2019, 16(5): 46–61. doi: [10.23919/j.cc.2019.05.004](https://doi.org/10.23919/j.cc.2019.05.004).
- [6] ATALOGLOU V G, TARAVATI S, and ELEFTHERIADES G V. Metasurfaces: Physics and applications in wireless communications[J]. *National Science Review*, 2023, 10(8): nwad164. doi: [10.1093/nsr/nwad164](https://doi.org/10.1093/nsr/nwad164).
- [7] BAO Lei, WU Ruiyuan, FU Xiaojian, *et al.* Multi-beam forming and controls by metasurface with phase and amplitude modulations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(10): 6680–6685. doi: [10.1109/TAP.2019.2925289](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2925289).
- [8] LI Haipeng, WANG Guangming, CAI Tong, *et al.* Wideband transparent beam-forming metadvice with amplitude- and phase-controlled metasurface[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(1): 014043. doi: [10.1103/PhysRevApplied.11.014043](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014043).
- [9] LIU Zhuoyang, ZHANG Haiyang, HUANG Tianyao, *et al.* Hybrid RIS-assisted MIMO dual-function radar-communication system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 1650–1665. doi: [10.1109/TSP.2024.3371193](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3371193).
- [10] LIU Mingkai, KOZYREV A B, and SHADRIVOV I V. Time-varying metasurfaces for broadband spectral camouflage[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(5): 054052. doi: [10.1103/PhysRevApplied.12.054052](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.054052).
- [11] WANG Xiaoyi and CALOZ C. Spread-spectrum selective camouflaging based on time-modulated metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1): 286–295. doi: [10.1109/TAP.2020.3008621](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3008621).
- [12] WANG Xiaoyi and CALOZ C. Pseudorandom sequence (space-) time-modulated metasurfaces: Principles, operations, and applications[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2022, 64(4): 135–144. doi: [10.1109/MAP.2022.3169387](https://doi.org/10.1109/MAP.2022.3169387).
- [13] WANG Xiaoyi, TONG Meisong, and ZHAO Lei. Pseudorandom noise sequence time-modulated reflective metasurfaces for target recognition[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(8): 3446–3454. doi: [10.1109/TMTT.2023.3276050](https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3276050).
- [14] 周群焰, 王思然, 戴俊彦, 等. 基于时空编码数字超表面的雷达散射截面积缩减及波达角估计方法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2024, 13(1): 150–159. doi: [10.12000/JR23216](https://doi.org/10.12000/JR23216).
ZHOU Qunyan, WANG Siran, DAI Junyan, *et al.* Simultaneous direction of arrival estimation and radar cross-section reduction based on space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(1): 150–159. doi: [10.12000/JR23216](https://doi.org/10.12000/JR23216).

- [15] WANG Junjie, FENG Dejun, XU Letao, *et al.* Synthetic aperture radar target feature modulation using active frequency selective surface[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(6): 2113–2125. doi: [10.1109/JSEN.2018.2886013](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2886013).
- [16] WANG Junjie, FENG Dejun, XU Letao, *et al.* Synthetic aperture radar image modulation using phase-switched screen[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(5): 911–915. doi: [10.1109/LAWP.2018.2823079](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2823079).
- [17] LI Shiyuan, WANG Jianyang, FANG Xinyu, *et al.* Jamming of ISAR imaging with time-modulated metasurface partially covered on targets[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(2): 372–376. doi: [10.1109/LAWP.2022.3212923](https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3212923).
- [18] LIU Xiaobin, WU Qihua, PAN Xiaoyi, *et al.* SAR image transform based on amplitude and frequency shifting joint modulation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(4): 7043–7052. doi: [10.1109/JSEN.2025.3526608](https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3526608).
- [19] PAN Qin, XU Hong, XU Heng, *et al.* Quantitative analysis of metasurface with random phase modulation on complex HRRP: A statistical perspective[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(10): 8118–8135. doi: [10.1109/TMTT.2025.3572203](https://doi.org/10.1109/TMTT.2025.3572203).
- [20] XIAO Guoyao, LIU Yujie, XU Hong, *et al.* Theoretical analysis of random phase modulation effects on radar pulse compression by the time-modulated metasurface[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(8): 5443–5456. doi: [10.1109/TMTT.2025.3539663](https://doi.org/10.1109/TMTT.2025.3539663).
- [21] WANG Ruijun, HE Sisan, SUI Sai, *et al.* Radar shielding jamming method based on random phase modulation of digital coding metasurface[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2024, 38(17): 1901–1920. doi: [10.1080/09205071.2024.2405674](https://doi.org/10.1080/09205071.2024.2405674).
- [22] DAI Junyan, ZHAO Jie, CHENG Qiang, *et al.* Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 90. doi: [10.1038/s41377-018-0092-z](https://doi.org/10.1038/s41377-018-0092-z).
- [23] ZHANG Lei and CUI Tiejun. Space-time-coding digital metasurfaces: Principles and applications[J]. *Research*, 2021, 2021: 9802673. doi: [10.34133/2021/9802673](https://doi.org/10.34133/2021/9802673).
- [24] ZHAO Jie, YANG Xi, DAI Junyan, *et al.* Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems[J]. *National Science Review*, 2019, 6(2): 231–238. doi: [10.1093/nsr/nwy135](https://doi.org/10.1093/nsr/nwy135).
- [25] KE Junchen, DAI Junyan, ZHANG Junwei, *et al.* Frequency-modulated continuous waves controlled by space-time-coding metasurface with nonlinearly periodic phases[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 273. doi: [10.1038/s41377-022-00973-8](https://doi.org/10.1038/s41377-022-00973-8).
- [26] WANG Junjie, FENG Dejun, XU Zhiming, *et al.* Time-domain digital-coding active frequency selective surface absorber/reflector and its imaging characteristics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(6): 3322–3331. doi: [10.1109/TAP.2020.3037757](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3037757).
- [27] ZHU Yonggeng, FANG Xinyu, LI Mengmeng, *et al.* Time-frequency-modulated metasurface for false target generation in symmetrical triangular LFM continuous-wave radars[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(5): 2531–2543. doi: [10.1109/TMTT.2024.3473317](https://doi.org/10.1109/TMTT.2024.3473317).
- [28] FANG Xinyu, LI Mengmeng, LI Shiyuan, *et al.* Diverse frequency time modulation for passive false target spoofing: Design and experiment[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 72(3): 1932–1942. doi: [10.1109/TMTT.2023.3305187](https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3305187).
- [29] LIU Sijia, WANG Junjie, MA Yan, *et al.* Radar target HRRP modulation utilizing multifrequency time-varying metasurface[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(11): 9495–9508. doi: [10.1109/TMTT.2025.3599505](https://doi.org/10.1109/TMTT.2025.3599505).

作者简介

许 恒, 博士生, 主要研究方向为电磁特征调控。

许 红, 副教授, 主要研究方向为电磁特征调控。

全英汇, 教授, 主要研究方向为智能感知和敏捷雷达。

傅昊升, 博士, 主要研究方向为信息超表面设计与雷达成像。

潘 秦, 博士生, 主要研究方向为电磁特征调控。

陈展野, 副教授, 主要研究方向为新型电磁调控系统信息处理。

周小阳, 教授, 主要研究方向为超大规模复杂电磁仿真计算。

(责任编辑: 于青)