



超表面调控多普勒频移中的非理想调制效应研究

文明浩, 李猛猛, 丁大志

Non-ideal modulation effects in Doppler frequency shift control using metasurface

WEN Minghao, LI Mengmeng, and DING Dazhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024228>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

时间调制阵列天线的非理想波形调制研究

Research on non-ideal waveform modulation of time modulation array antenna

电波科学学报. 2022, 37(3): 388-393

2比特移相电路非理想时间调制的谐波特性研究

Research on harmonic characteristics of non-ideal time modulation of 2-bit phase-shifting circuit

电波科学学报. 2022, 37(6): 933-939

低复杂度时空调制超表面设计方法与应用

Low complexity design method of space-time modulated metasurface and its applications

电波科学学报. 2022, 37(6): 992-999

2比特时间调制阵列的非理想特性建模研究

Modeling of nonideal characteristics in 2-bit time-modulated arrays

电波科学学报. 2022, 37(6): 925-932

超表面调制天线的国内外最新进展

The latest development of the modulated metasurface antenna

电波科学学报. 2021, 36(4): 498-510

一种基于2 bit阶梯波时间调制的高精度幅度调控方法

A method of high precision amplitude control method based on 2 bit step-wave time-modulation

电波科学学报. 2024, 39(4): 715-721



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 文明浩, 李猛猛, 丁大志. 超表面调控多普勒频移中的非理想调制效应研究[J]. 电波科学学报, 2025, 40(6): 1078-1084+1091. DOI: 10.12265/j.cjors.2024228

WEN M H, LI M M, DING D Z. Non-ideal modulation effects in Doppler frequency shift control using metasurface[J]. Chinese journal of radio science, 2025, 40(6): 1078-1084+1091. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024228

超表面调控多普勒频移中的非理想调制效应研究

文明浩 李猛猛* 丁大志

(南京理工大学, 南京 210094)

摘要 针对多普勒频移超表面调制波形非理想导致调制效果差的问题, 提出了基于非理想阶梯电压波形的超表面调制效果分析模型。由于 PIN 二极管和变容二极管等非线性元件与超表面结构相互作用耦合, 使得非理想效应更加复杂难以分析, 本模型以具有不同上升、下降沿的阶梯电压波形模拟各种调制频率的输出情况, 根据超表面在不同电压值下的反射系数, 在调制周期内将电压波形转换成经超表面调制后的反射系数时序, 经过傅里叶变换得到频谱, 从而能够分析出非理想调制对频谱中各阶谐波的影响。一款 X 波段的 2 比特相位调制超表面样机验证了模型的有效性。仿真和测试结果表明, 该模型对超表面调控多普勒频移中的非理想调制效应具有准确的分析, 为进一步优化非理想调制频谱提供了理论支持。

关键词 时间调制超表面; 电磁波调控; 多普勒频移; 非理想调制; 傅里叶系数

中图分类号 TN821.1

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2025)06-1078-07

DOI 10.12265/j.cjors.2024228

Non-ideal modulation effects in Doppler frequency shift control using metasurface

WEN Minghao LI Mengmeng* DING Dazhi

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract In response to the poor modulation effect of metasurfaces in modulating Doppler frequency shifts due to non-ideal modulation waveforms, this paper proposes an analysis model for metasurface modulation effects based on non-ideal stepped voltage waveforms. Due to the interaction and coupling between nonlinear components such as PIN diodes and varactor diodes with metasurface structure, the non-ideal effects become more complex and difficult to analyze. This model simulates output conditions under various modulation frequencies using stepped voltage waveforms with different rise and fall times. According to the reflection coefficients of metasurfaces at different voltage values, within the modulation cycle, the voltage waveform is converted into the reflection coefficient sequence after metasurfaces modulation. After performing a Fourier transform, the spectrum is obtained, thereby enabling analysis of the impact of non-ideal modulation on each harmonic in the spectrum. An X-band 2-bit phase modulation metasurface prototype verified the effectiveness of the model. Simulation and test results show that this model accurately analyzes non-ideal modulation effects of metasurfaces in Doppler frequency shift control, providing theoretical support for further optimization of non-ideal modulation spectra.

Keywords time-modulated metasurface; EM waves scattering; Doppler frequency shift; non-ideal modulation; Fourier coefficients

收稿日期: 2024-11-11 修回日期: 2025-03-04

资助项目: 国家自然科学基金 (62222108, 32261133623) **Foundation Items:** National Natural Science Foundation of China (62222108, 32261133623)

*通信作者: 李猛猛 E-mail: limengmeng@njjust.edu.cn **Corresponding Author:** LI Mengmeng E-mail: limengmeng@njjust.edu.cn

0 引言

电磁超表面作为超材料的二维形式具有强大的电磁波调控能力^[1], 因其低复杂度、小体积、低剖面及易于集成等优点在雷达成像、无线通信、电子对抗等多个领域都有着广泛且重要的应用潜力, 可灵活调控电磁波实现诸如雷达散射截面缩减^[2-3]、聚焦^[4]、波束调控^[5]、涡旋场生成^[6]、成像^[7]等。时间调制超表面通过对其可调元件加载随时间变化的激励, 对电磁波幅度、相位和极化进行复杂调控, 从而可以实现雷达一维距离像干扰^[8]、合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 和逆 SAR (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 成像干扰^[9]以及生成微动时频特征^[10]等。但是, 实际调制中产生的非理想效应对电磁波调控造成的影响不可忽略。传统相控阵天线从天线激励信号源建立非理想模型, 通过对调制波形进行傅里叶变换, 分析非理想调制信号对辐射频谱的影响^[11]。非理想调制信号直接体现在天线激励信号源上, 射频开关在较高的调制频率下受非理想调制波形的影响较大^[12-14], 会导致时间调制阵列的仿真性能和实际性能之间的较大差异。而时间调制超表面在高速调制过程中也会受非理想效应的影响, 导致对电磁波的调控效率低于预期。由于非理想调制波形与单元电磁响应非理想耦合叠加, 使其产生的非理想效应更加复杂难以分析, 并且调制频率越高, 非理想效应越明显。因此, 构建时间调制超表面在非理想调制下调控效率的量化分析模型是很有必要的。

本文提出了超表面非理想调制模型, 并以一种 2 比特非理想阶梯电压波形为例进行研究。引入基于变容二极管的相位调制超表面, 通过改变变容二极管的偏置电压得到超表面在不同电压下的反射系数。由于上升、下降沿的存在会影响超表面单元的幅度相位响应, 从而干扰超表面的调制相位变化。在调制周期内对具有上升、下降沿的非理想调制电压波形转换成经超表面调制的反射系数时序, 傅里叶变换后得到非理想调制频谱, 由此分析非理想调制对各阶谐波的影响, 并通过 X 波段的 2 比特调相超表面样机实测对比验证了所建立模型的有效性。

1 超表面非理想调制模型

以调控产生单边带频谱为例, 超表面单元通过时间调制产生 +1 或 -1 阶谐波, 分别对应于入射电磁波的蓝移与红移。为此超表面反射系数时序 $\Gamma(t)$ 需要引入多普勒频移 $e^{j2\pi f_d t}$, 即实现时变相位 $\varphi(t)$, 表达式

如下:

$$\Gamma(t) = |\Gamma| e^{j2\pi f_d t} = |\Gamma| e^{j\varphi(t)} \quad (1)$$

在理想模型中, 反射系数的幅值 $|\Gamma|$ 保持在 1 不变, 而连续的时变相位 $\varphi(t)$ 通常以等时间步长的 2 比特、3 比特或更多位数的离散相位状态来近似。对于 2 比特调制, 相位离散为 4 种状态: e^{j0} 、 $e^{j\pi/2}$ 、 $e^{j\pi}$ 和 $e^{j3\pi/2}$, 每个状态的持续时间均为 $T_d/4$, 可以表示为

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_i, & \frac{i-1}{4}T_d < t < \frac{i}{4}T_d, \quad i = 0, 1, 2, 3 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varphi_i \in [e^{j0}, e^{j\pi/2}, e^{j\pi}, e^{j3\pi/2}]$ 为超表面调制反射相位时序; T_d 为调制周期。

要实现这样的反射系数时序需要利用现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 给超表面提供时变偏置电压, 阶梯电压波形中的 4 个电压值对应于所需的离散相位。对于非理想模型, 如图 1 所示, FPGA 在切换电压的过程中会产生上升沿和下降沿, 影响超表面在调制周期内的幅度相位响应, 从而导致超表面实际反射性能与理想仿真之间存在偏差。

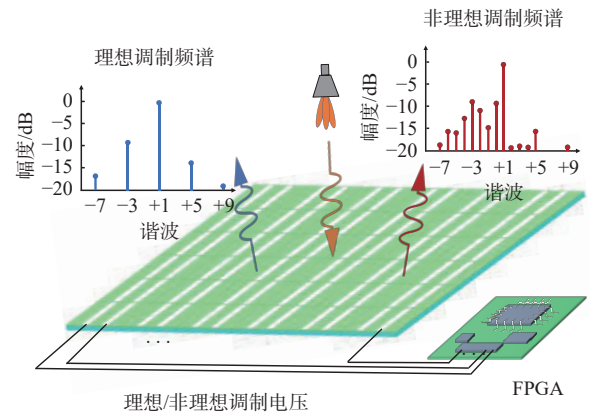


图 1 超表面非理想调制示意图

Fig. 1 Schematic of non-ideal modulation of metasurface

根据 FPGA 实际输出的电压波形可知, 不同调制频率下电压波形的上升、下降沿随时间几乎不变。随着调制信号频率的提高, 调制电压波形非理想程度越高, 每个调制状态持续时间不满足 $T_d/4$ 使得超表面调制过程中产生的非理想效应越严重。因此本文通过上升、下降沿表征不同调制频率下的非理想调制电压波形, 以此作为构建模型的出发点。

1.1 非理想阶梯电压波形

为了精确分析出非理想调制电压波形所带来的非理想效应, 本文以 2 比特非理想电压阶梯波进行分析。假设加载到超表面上第 l 列的调制电压波形为

$$U_i(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} u_i(t - aT_d) \quad (3)$$

式中, $u_i(t)$ 为单个周期内的调制电压函数。图2给出了理想与非理想电压阶梯调制波形示意图。

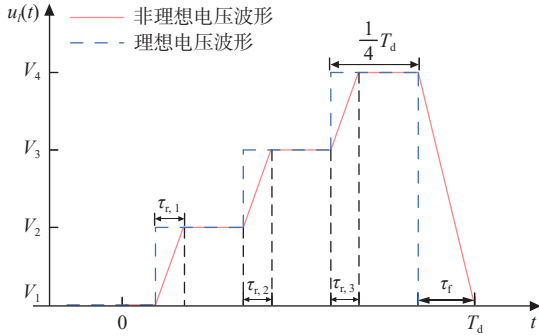


图2 两种电压阶梯调制波形示意图

Fig. 2 Schematic of 2 voltage staircase modulation waveform

对于非理想调制电压波形中上升、下降沿斜率的定义如下:

$$k_r = \frac{V_4 - V_1}{mT_d}, \quad k_f = -\frac{V_4 - V_1}{nT_d} \quad (4)$$

式中: k_r 和 k_f 分别为电压阶梯波的上升沿和下降沿斜率; V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 为 2 比特调制所需要的 4 个从小到大排序的电压值; m 和 n 分别为波形中控制上升、下降沿斜率的参数, 用来表征电压波形的非理想程度, 即模拟使用不同调制频率进行多普勒频移的调控。那么, 上升时间 $\tau_{r,p}$ ($p = 1, 2, 3$)、下降时间 τ_f 可以表示如下:

$$\tau_{r,p} = \frac{V_{p+1} - V_p}{k_r}, \quad \tau_f = -\frac{V_4}{k_f} \quad (5)$$

考虑到非理想电压波形在超表面调控多普勒频移的过程中为周期循环, 以上一个周期的下降沿到 V_1 处为一个调制周期的起点, 则单个调制周期的非理想电压函数 $u_i(t)$ 为

$$u_i(t) = \begin{cases} k_r \left(t - \frac{pT_d}{4} + \tau_1 \right) + V_p, & \frac{pT_d}{4} - \tau_1 \leq t < \frac{pT_d}{4} - \tau_1 + \tau_{p+1} \\ k_f(t - T_d) + V_1, & T_d - \tau_1 \leq t < T_d \\ V_q, & \frac{(q-1)T_d}{4} - \tau_1 + \tau_q \leq t < \frac{qT_d}{4} - \tau_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $q = 1, 2, 3, 4$; $\tau \in \{\tau_r, \tau_{r,1}, \tau_{r,2}, \tau_{r,3}\}$ 非理想变化时间的集合。

1.2 频谱非理想程度分析

在这种非理想波形的调制下, 通过将电压值转换为超表面相应的反射幅度和相位, 得到超表面对

电磁波的反射系数时序 $\Gamma(t)$:

$$\Gamma(t) = \sum_{p=1}^3 \Gamma(u_{r,p}(t)) \text{rect} \left(\frac{t - \left(\frac{pT_d}{4} - \tau_1 + \frac{\tau_{p+1}}{2} \right)}{\tau_{p+1}} \right) + \Gamma(u_f(t)) \text{rect} \left(\frac{t - \left(T_d - \frac{\tau_1}{2} \right)}{\tau_1} \right) + \sum_{q=1}^4 \Gamma_q \text{rect} \left(\frac{t - \left(\frac{(2q-1)T_d}{8} - \tau_1 + \frac{\tau_q}{2} \right)}{\frac{T_d}{4} - \tau_q} \right) \quad (7)$$

式中: $\Gamma(u_{r,p}(t))$ 和 $\Gamma(u_f(t))$ 分别表示非理想电压波形在上升、下降沿对应的反射系数; Γ_q 为对应调制电压在 V_q 下的反射系数。

周期内超表面在非理想电压波形与理想电压波形调制下反射的幅度和相位响应如图3所示, 其中 $m = 0.2$, $n = 0.15$ 。理想 2 比特调制下, 一个调制周期内只有 4 种相位状态且能够瞬时切换, 通过近似连续的时变相位来实现单边带调制。而在上升和下降沿均为一定斜率的非理想电压波形的调制下, 超表面每次在相位状态的切换过程中会产生不同的上升或者下降时间, 期间映射为不同的相位变化曲线, 这会对超表面调控多普勒频移造成较大的影响。

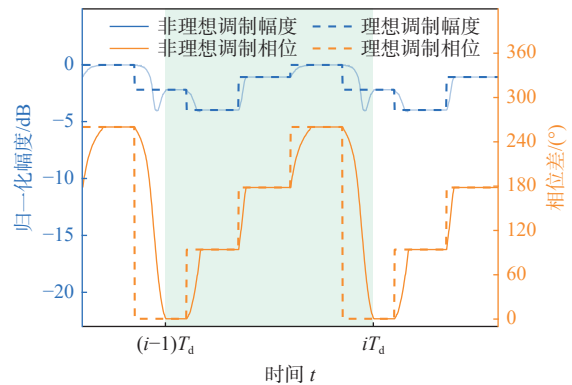


图3 非理想/理想调制反射幅相变化曲线

Fig. 3 Variation curves of reflection amplitude and phase for non-ideal/ideal modulation

在单边带调制的频谱中, 一阶谐波是主导分量。由傅里叶级数的性质可知, 超表面反射系数可以展开为

$$\Gamma_l(t) = \sum_{a=-\infty}^{+\infty} \Gamma(t - aT_d) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} \alpha_h e^{j2\pi h f_d t} \quad (8)$$

式中: $\Gamma_l(t)$ 为超表面第 l 列调制单元的时变反射系数;

α_h 为第 l 列单元的第 h 阶谐波复幅度,

$$\begin{aligned} \alpha_h &= \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} \Gamma_l(t) e^{-j2\pi h f_d t} dt \\ &= \frac{1}{T_d} \left[\sum_{p=1}^3 \int_{V_p}^{V_{p+1}} \Gamma_l(u_{r,p}) e^{-j2\pi h f_d \left(\frac{u_{r,p}}{k_r} - \tau_1 + \frac{u_{r,p}}{k_r} \right)} \frac{du_{r,p}}{k_r} \right. \\ &\quad \left. + \int_{V_4}^{V_1} \Gamma_l(u_f) e^{-j2\pi h f_d \left(\frac{u_f}{k_f} + T_d \right)} \frac{du_f}{k_f} \right] \\ &\quad - \sum_{q=1}^4 \frac{\Gamma_{lq} e^{-j2\pi h f_d \left(\frac{C_d - 1}{8} T_d - \tau_1 + \frac{\tau_q}{2} \right)}}{\pi h} \sin \left[\pi h f_d \left(\tau_q - \frac{T_d}{4} \right) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

由于参数 m 和 n 与超表面反射幅度和相位之间是非线性关系, 使得在非理想波形的调制下其傅里叶展开式较为复杂, 式 (9) 表明谐波在偏置电压 V_q 调制下的部分是能够通过数值计算得出的, 而 m 和 n 控制电压波形中的上升、下降沿是产生非理想调制效应的主要因素。

上升、下降沿时长即参数 m 和 n 的取值, 对于超表面调控多普勒频移的影响需要找到能够被量化的标准, 用于表征所产生调制频谱的非理想程度。本文所构建的模型同时采用了两种衡量指标来描述在不同上升、下降沿的调制电压波形条件下, 经过调制反射后频谱的变化情况, 分别是谐波效率^[15] 和谐波相对差。

谐波效率表征目标阶谐波的能量对于谐波总能量的占比, 其表达式如下:

$$\eta^H = \frac{\sum_{j \in \Omega} |a_j|^2}{\sum_{h=-\infty}^{\infty} |a_h|^2} \quad (10)$$

式中, $\Omega = \{+1, -3, +5, -7, +9\}$ 为单边带调制中本模型所设置的目标阶谐波集合。

谐波相对差表征一阶谐波与其他阶谐波之间的隔离程度, 其表达式如下:

$$\eta^E = \frac{|a_1 - \max(a_s)|^2}{|a_1|^2} \quad (11)$$

式中, a_s 为非 +1 阶的谐波。

以图 3 中调制电压波形与反射系数时序的对应关系为例, 研究在非理想波形的调制下反射频谱随 m 和 n 的变化情况。 $m=n=0$ 表示理想情况。

由图 4 可以看出, 当电压波形只有上升沿时, 理论功率谱的目标阶谐波幅度随 m 的增大而减小, 但变化幅度较小, 且阶数越高受到的影响越大。其他阶谐波幅度随 m 的增大而增大, 且会产生理想调制下没有的谐波。因此, 谐波效率受 m 的影响较小, 但谐波相对差会随 m 的增大而增大。由图 5 可以看出, 当电压波形只有下降沿时, 理论功率谱的负阶谐波幅度

随 n 的增大而增大, 且越靠近 +1 阶幅度变化越大。其他阶谐波幅度虽也受下降沿的影响, 但是幅度变化相对较小。因此, 谐波效率会随 n 的增大而明显减小, 相对差也会有一定影响。

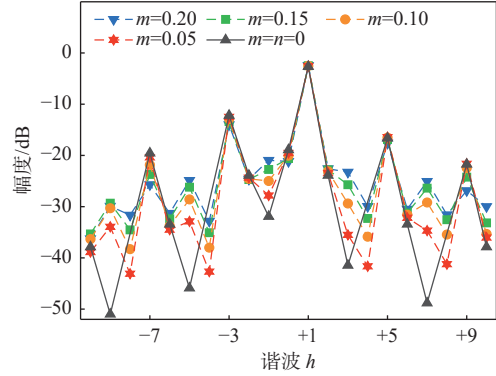


图 4 随 m 变化的理论功率谱

Fig. 4 Theoretical power spectrum varying with m

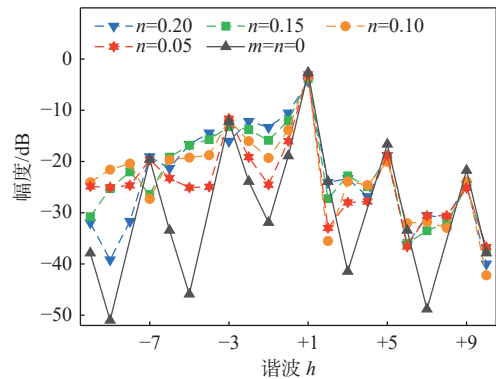
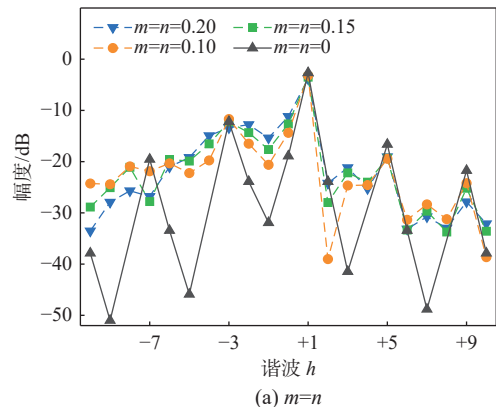


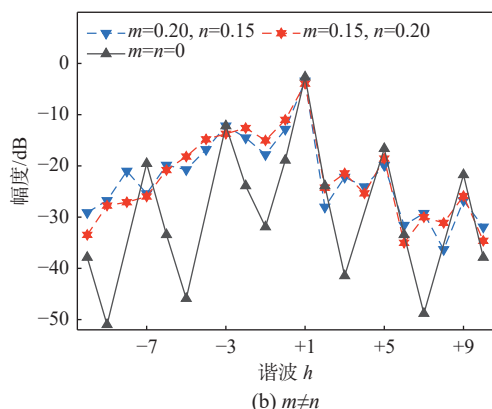
图 5 随 n 变化的理论功率谱

Fig. 5 Theoretical power spectrum varying with n

图 6 给出了上升沿、下降沿兼具的非理想电压波形调制下反射频谱的变化。从图 6(a) 可以看出, 当 m 和 n 取相同值时, 谐波幅度同时具有图 4 和图 5 的特征。图 6(b) 中 m 和 n 取不同值时, 也同样符合图 4 和图 5 的特征。这表明由调制产生的非理想频谱随变量 n 变化的非理想程度更高, 即非理想波形中的下降沿是超表面产生非理想调制效应的重要因素。



(a) $m=n$

图6 随 m, n 变化的理论功率谱Fig. 6 Theoretical power spectrum varying with m and n

2 非理想模型的有效性验证

2.1 2 比特相位调制超表面样机

通过使用相位调制超表面进行实验来验证上节提出来的非理想调制模型。在超表面上加载变容二极管,通过控制偏置电压,调节变容二极管的等效电路,进而调控超表面的反射性能,实现多普勒频移。

根据模型需要设计了2比特相位可调的超表面单元^[16]。超表面单元共由三层组成,最上层由两条带状线和一个变容二极管组成,变容管型号为MACOM公司生产的MADP-000120-1411。中间一层是0.2 mm厚度的聚酰亚胺($\epsilon_{r1} = 3.5$),最下面一层是1 mm厚度接地的PVC($\epsilon_{r2} = 2.3$)。实测4个离散相位调控状态的偏置电压分别为0 V、5 V、7.5 V和15 V。超表面样机实物图如图7所示,其由 20×20 的单元组成。通过使用矢量网络分析仪(Agilent N5244A)测得其反射幅度和相位随电压变化的曲线,结果如图7所示。

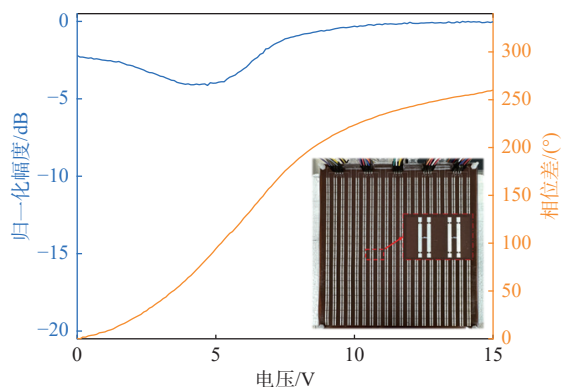


图7 样机实物及其反射系数随电压的变化曲线

Fig. 7 The curve of the prototype and its reflection coefficient as a function of voltage value

超表面样机所需的偏置电压由高速DAC模块(PXIe-6739)提供,由于电压波形采样点足够多,能够模拟出相对理想的情况,同样非理想波形上升、下降

沿也是由多采样点来实现。在一定调制频率 f_d 下,使用示波器采集到的电压波形如图8所示。

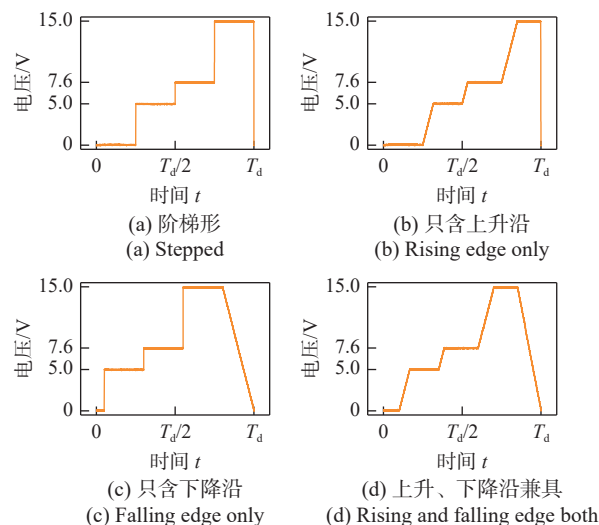


图8 实测电压波形

Fig. 8 Measured voltage waveform

2.2 实测结果验证

图9为验证非理想调制模型的实验场景,中心频率为10.3 GHz的点频信号从发射天线发出,通过高速DAC模块给超表面样机提供不同的调制电压波形完成多普勒频移的调控,最后经接收天线在频谱仪测出调制频谱。

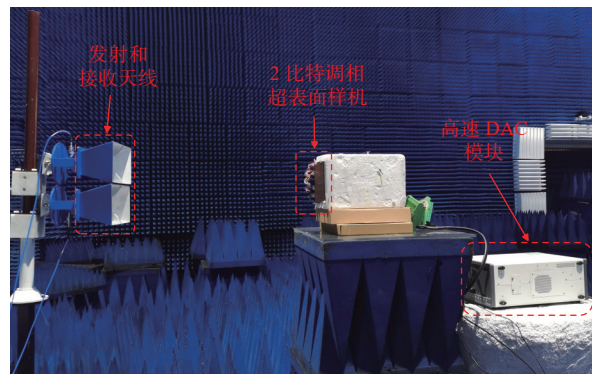


图9 实验场景

Fig. 9 Experimental scenario

由图4、图10~11的对比分析可以看出,当电压波形只有上升沿时,理论功率谱与实测功率谱基本相同。即使有非目标阶谐波产生但幅度并未超过目标阶谐波,因此谐波效率和谐波相对差受 m 的影响较小。仿真与实测结果趋势相同,数据吻合。其中,谐波效率误差最大为2.39%,谐波相对差的误差最大为0.21%。

由图5、图12~13的对比分析可以看出,当电压波形只有下降沿时,理论功率谱与实测功率谱也基本相同,但负阶谐波幅度变化大。实测谐波效率随

n 的增大从 95.32% 减小到 60.44%, 与仿真计算的误差最大为 1.59%。实测谐波相对差受 n 的影响较小, 误差为 1.9%。

图 14 展示了超表面样机在上升沿、下降沿兼具的非理想电压波形调制下反射频谱的变化情况, 与仿真结果基本相符。表 1~4 给出了相应谐波效率和谐波相对差的仿真与实测结果及两者之间的误差。

根据所有的实测与仿真结果的对比分析可知,

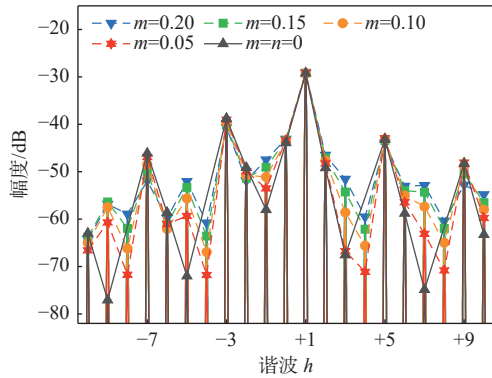


图 10 随 m 变化的实测功率谱

Fig. 10 Measured power spectrum varying with m

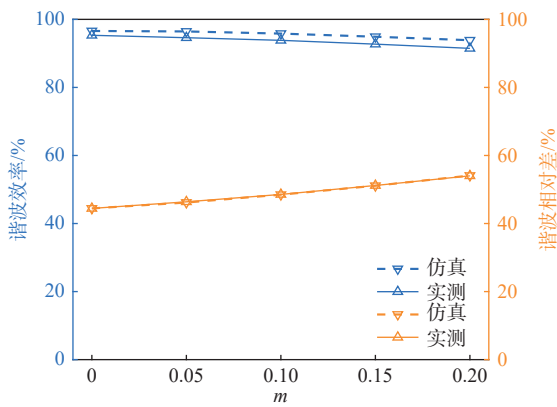


图 11 随 m 变化的谐波效率与谐波相对差

Fig. 11 Harmonic efficiency and relative difference varying with m

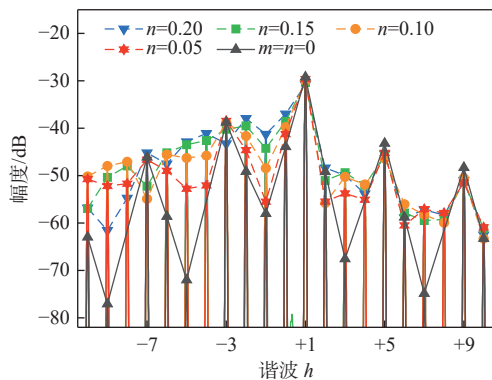


图 12 随 n 变化的实测功率谱

Fig. 12 Measured power spectrum varying with n

谐波效率和谐波相对差的误差均小于 3%, 验证了本文所提出的超表面非理想调制模型的有效性。

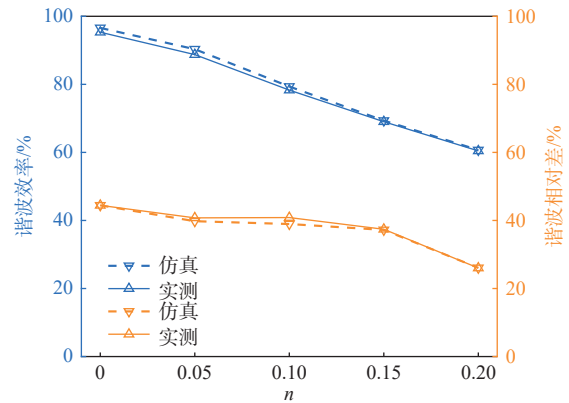
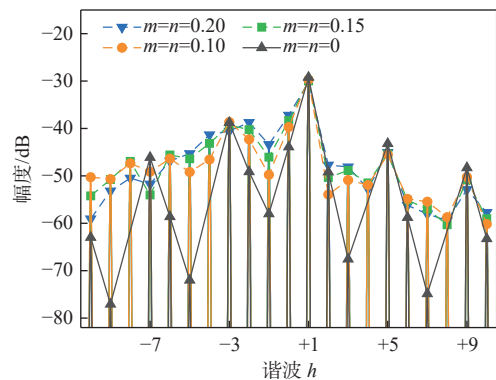
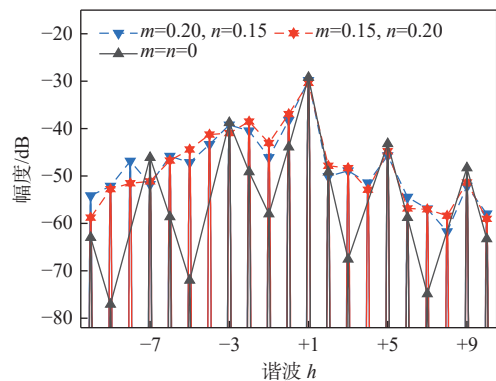


图 13 随 n 变化的谐波效率与谐波相对差

Fig. 13 Harmonic efficiency and relative difference varying with n



(a) $m=n$



(b) $m \neq n$

图 14 随 m, n 变化的实测功率谱

Fig. 14 Measured power spectrum varying with m and n

表 1 $m = n$ 时的谐波效率

Tab. 1 Harmonic efficiency when $m = n$ %

调制波形	仿真	实测	误差
$m=n=0$	96.59	95.32	1.27
$m=n=0.10$	83.16	81.35	1.81
$m=n=0.15$	74.70	73.06	1.64
$m=n=0.20$	67.31	66.14	1.17

表2 $m = n$ 时的谐波相对差Tab. 2 Harmonic relative difference when $m = n$ %

调制波形	仿真	实测	误差
$m=n=0$	44.44	44.44	0
$m=n=0.10$	38.91	41.16	2.25
$m=n=0.15$	40.12	38.17	1.95
$m=n=0.20$	32.53	30.35	2.18

表3 $m \neq n$ 时的谐波效率Tab. 3 Harmonic efficiency when $m \neq n$ %

调制波形	仿真	实测	误差
$m=0.20, n=0.15$	75.99	74.06	1.93
$m=0.15, n=0.20$	65.81	64.41	1.40

表4 $m \neq n$ 时的谐波相对差Tab. 4 Harmonic relative difference when $m \neq n$ %

调制波形	仿真	实测	误差
$m=0.20, n=0.15$	40.39	38.46	1.93
$m=0.15, n=0.20$	31.02	28.18	2.84

3 结论

本文针对多普勒频移超表面调制波形非理想导致调制效果差的问题,提出了基于非理想阶梯电压波形的超表面调制效果分析模型,并以一种2比特非理想阶梯电压波形为例进行了研究。首先,设置具有上升、下降沿的阶梯电压波形模拟实际调制情况。引入基于变容二极管的相位调制超表面,通过改变变容二极管的偏置电压得到超表面在不同电压下的反射幅度和相位响应。然后,在调制周期内将电压波形转换成经超表面调制的反射系数时序,经过傅里叶变换得到频谱。最后,以谐波效率和谐波相对差讨论非理想波形对调制效果的影响。数值仿真和测试结果验证了所提出模型的有效性,为进一步优化非理想调制频谱提供了理论支持。

参考文献

- [1] 孙树林,何琼,周磊. 电磁超表面[J]. 物理, 2015, 44(6): 366-376.
SUN S L, HE Q, ZHOU L. Electromagnetic metasurfaces[J]. Physics, 2015, 44(6): 366-376. (in Chinese)
- [2] LIU T, CAO X, GAO J, et al. RCS reduction of waveguide slot antenna with metamaterial absorber[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 61(3): 1479-1484.
- [3] 王彦朝,许河秀,王朝辉,等. 电磁超材料吸波体的研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(13): 134101.
WANG Y Z, XU H X, WANG C H, et al. Research progress of electromagnetic metamaterial absorbers[J]. Acta physica sinica, 2020, 69(13): 134101. (in Chinese)
- [4] LI M, LI S, CHIN L K, et al. Dual-layer achromatic metalens design with an effective Abbe number[J]. Optics express, 2020, 28(18): 26041-26055.
- [5] 曹卫平,蒋蕙霞,盛丽丽,等. 应用于毫米波段的宽带波束调控超表面设计[J]. 微波学报, 2023, 39(5): 142-147.
CAO W P, JIANG H X, SHENG L L, et al. Design of a broadband beam-modulated metasurface for millimeter-wave applications[J]. Journal of microwaves, 2023, 39(5): 142-147. (in Chinese)
- [6] HANG D, CAO X, YANG H, et al. Multiple OAM vortex beams generation using 1-bit metasurface[J]. Optics express, 2018, 26(19): 24804-24815.
- [7] REDO-SANCHEZ A, HESHMAT B, AGHASI A, et al. Terahertz time-gated spectral imaging for content extraction through layered structures[J]. Nature communications, 2016, 7(1): 1-7.
- [8] KOZLOV V, VOVCHUK D, GINZBURG P. Radar range deception with time-modulated scatterers[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2023, 71: 4486-4491.
- [9] 王俊杰,冯德军,王志淦,等. 电控时变电磁材料的 SAR 成像特性研究[J]. 雷达学报, 2021, 10(6): 865-873.
WANG J J, FENG D J, WANG Z S, et al. Synthetic aperture radar imaging characteristics of electronically controlled time-varying electromagnetic materials[J]. Journal of radars, 2021, 10(6): 865-873. (in Chinese)
- [10] HOU Y, ZHU Y, LI M, et al. Scattering center model inspired micro-motion false target generation using time-modulated metasurface[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2024, 23(12): 4273-4277.
- [11] 罗玉川,向磊,高彦昌,等. 时间调制阵列天线的非理想波形调制研究[J]. 电波科学学报, 2022, 37(3): 388-394.
LUO Y C, XIANG L, GAO Y C, et al. Research on non-ideal waveform modulation of time modulation array antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2022, 37(3): 388-394. (in Chinese)
- [12] 黎皓天,陈益凯,杨仕文. 2比特时间调制阵列的非理想特性建模研究[J]. 电波科学学报, 2022, 37(6): 925-932.
LI H T, CHEN Y K, YANG S W. Modeling of nonideal characteristics in 2-bit time-modulated arrays[J]. Chinese journal of radio science, 2022, 37(6): 925-932. (in Chinese)

(下转第1091页)

- [22] ZHAO S, ZHOU C, SHEN X, et al. Investigation of VLF transmitter signals in the ionosphere by ZH-1 observations and full-wave simulation[J]. *Journal of geophysical research: space physics*, 2019, 124(6): 4697-4709.
- [23] ZHAO S, LIAO L, SHEN X, et al. Solar cycle variation of radiated electric field and ionospheric reflection height over NWC transmitter during 2005-2009: DEMETER spacecraft observations and simulations[J]. *Journal of geophysical research: space physics*, 2024, 129(3). DOI: [10.1029/2023JA032282](https://doi.org/10.1029/2023JA032282)
- [24] LEHTINEN N G, INAN U S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet[J]. *Journal of geophysical research: space physics*, 2008, 113(A6). DOI: [10.1029/2007JA012911](https://doi.org/10.1029/2007JA012911)
- [25] LEHTINEN N G, INAN U S. Full-wave modeling of transionospheric propagation of VLF waves[J]. *Geophysical research letters*, 2009, 36(3). DOI: [10.1029/2008GL036535](https://doi.org/10.1029/2008GL036535)
- [26] 赵庶凡, 廖力, 张学民, 等. 地面甚低频辐射渗透进电离层的数值模拟分析[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(5): 825-833. ZHAO S F, LIAO L, ZHANG X M, et al. Full wave calculation of ground-based VLF radiation penetrating into the ionosphere[J]. *Chinese journal of radio science*, 2016, 31(5): 825-833. (in Chinese)

作者简介

李翹楚 (1993—), 女, 湖南人, 应急管理部国家自然灾害防治研究院硕士研究生, 研究方向为宽频带电磁背景场。E-mail: liqiaochu@whu.edu.cn

赵庶凡 (1985—), 女, 安徽人, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士, 研究方向为电磁卫星观测及电波传播。E-mail: zhaoshufan@nssc.ac.cn

廖力 (1983—), 男, 四川人, 中国地震局地球物理研究所副研究员, 博士, 研究方向为电波传播和地震电离层电磁异常。E-mail: liaoli@cea-igp.ac.cn

(上接第 1084 页)

- [13] MANEIRO-CATOIRA R, BRÉGAINS J, GARCÍA-NAYA J A, et al. Time-modulated phased array controlled with nonideal bipolar squared periodic sequences[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2019, 18(2): 407-411.
- [14] NI G, HE C, JIN R. An improved modulation module in time-modulated array[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2021, 21(3): 561-565.
- [15] CHEN Q, ZHANG J D, WU W, et al. Enhanced single-sideband time-modulated phased array with lower sideband level and loss[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 68(1): 275-286.
- [16] ZHU Y, FANG X, LI M, 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*, 2024: 1-13. DOI: [10.1109/TMTT.2024.3473317](https://doi.org/10.1109/TMTT.2024.3473317)

作者简介

文明浩 (2000—), 男, 南京理工大学电子工程与光电技术学院硕士研究生, 研究方向为超表面设计与应用。E-mail: wmh@njust.edu.cn

李猛猛 (1984—), 男, 南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授, 博士, 研究方向为军用/民用目标/动目标电磁特性建模、阵列天线与电磁超表面设计与实现、多尺度/多物理场建模方法与软件实现。E-mail: limengmeng@njust.edu.cn

丁大志 (1979—), 男, 南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授, 博士, 研究方向为电磁理论与计算电磁学。E-mail: dzding@njust.edu.cn