

基于极化时变调控表面的有源欺骗干扰辨识方法

陈焱^① 王占领^{*①} 庞晨^① 李永祯^① 王壮^②

^①(国防科技大学电子科学学院电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室 长沙 410073)

^②(国防科技大学电子科学学院自动目标识别全国重点实验室 长沙 410073)

摘要: 聚焦雷达对抗中极化信息获取与利用的应用需求, 该文研究了基于极化时变调控表面的有源欺骗干扰辨识方法。首先, 设计了一套在9.6~10.1 GHz频带内支持3 bit相位量化的各向异性相位调制表面, 通过优化相位调制编码序列, 实现了极化态按需调控。然后, 将极化调控表面加装在单极化雷达天线上, 使天线发射和接收电磁波的极化态沿特定极化轨道变化, 通过提取目标与有源欺骗干扰的极化域差异, 实现两者辨识。仿真分析表明, 在3种不同的极化轨道约束下, 干扰与目标均具有显著的聚类效应, 可获得稳定的干扰辨识效果。相较于依赖双极化或全极化雷达体制的干扰辨识方法, 该文所提方法兼具低成本与高效性, 在雷达抗干扰中具有很大的应用潜力。

关键词: 极化信息获取与利用; 相位调制编码; 极化态按需调控; 极化时变轨道; 有源欺骗干扰辨识

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2024)04-0929-12

DOI: 10.12000/JR24028

引用格式: 陈焱, 王占领, 庞晨, 等. 基于极化时变调控表面的有源欺骗干扰辨识方法[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(4): 929-940. doi: 10.12000/JR24028.

Reference format: CHEN Yan, WANG Zhanling, PANG Chen, *et al.* Radar active deception jamming recognition method based on the time-varying polarization-conversion metasurface[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(4): 929-940. doi: 10.12000/JR24028.

Radar Active Deception Jamming Recognition Method Based on the Time-varying Polarization-conversion Metasurface

CHEN Yan^① WANG Zhanling^{*①} PANG Chen^① LI Yongzhen^①
WANG Zhuang^②

^①(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(National Key Laboratory of Automatic Target Recognition, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In this study, aiming at fulfilling the requirement of polarization acquisition and utilization, a method for active deception jamming recognition based on the time-varying polarization-conversion metasurface is investigated. First, an anisotropic phase-modulated metasurface supporting 3-bit phase quantization in the 9.6~10.1 GHz frequency band is designed. By optimizing the periodical phase coding, the polarization state can be converted on demand. And then, loading the polarization-conversion metasurface on a single polarization radar antenna so that the polarization states of the antenna can change along a specific trajectory. By

收稿日期: 2024-02-23; 改回日期: 2024-04-25; 网络出版: 2024-05-30

*通信作者: 王占领 wangzhanling17@nudt.edu.cn

*Corresponding Author: WANG Zhanling, wangzhanling17@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61971429, 61921001, 62301580), 博士后基金(2022M723917)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971429, 61921001, 62301580), China Postdoctoral Science Foundation (2022M723917)

责任主编: 全英汇 Corresponding Editor: QUAN Yinghui

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

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

extracting the difference in the polarization domain between target and active deception jamming, the active deception jamming could be distinguished from the radar echo. The simulation results show that under the constraints of three different polarization trajectories, the active deception jamming and targets exhibit a significant clustering effect, and the identification effect is stable. Compared with jamming identification methods that rely on dual-polarization or full-polarization radar systems, the proposed method has both low cost and high efficiency, which has great application potential in radar anti-jamming.

Key words: Polarization acquisition and utilization; Periodical phase coding; Polarization converted on demand; Time-varying polarization trajectory; Active deception jamming recognition

1 引言

数字射频存储器(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)等先进电子技术器件的发展,为高逼真度转发式假目标干扰的工程应用提供了有力支持^[1]。DRFM通过截获、存储、调制并转发雷达信号,生成具有与雷达信号相干性强、调制方式多样、参数多变的假目标^[2,3],进一步压缩了时/频/空域处理空间,使雷达的生存能力和作战性能受到严重威胁。极化域作为时/频/空之外的独立信息域,蕴含目标形状、姿态等更丰富的信息,对提高雷达抗干扰能力具有很大的应用潜力^[4-7]。

针对有源欺骗干扰,通过雷达发射/接收通道的极化调控、波形设计以及信号处理等,可获取干扰与目标差异扩大化的极化特征,从而实现有源假目标的辨识^[8]。多项研究工作表明,针对脉冲重复周期(Pulse Repetition Interval, PRI)间恒定极化假目标、PRI内恒定极化假目标、全极化假目标以及脉内随机调制极化假目标等干扰类型,均可利用极化特征在雷达信号处理阶段实现对假目标的有效鉴别^[9-12]。然而,上述方法依赖于双极化或全极化等具备极化测量能力的雷达体制,对于仍占战场主体的单极化雷达而言,极化信息获取与利用面临现实困难。相较于通过增加极化通道的方式来实现双极化或全极化测量,变极化技术通过调控电磁波产生多种瞬时可调的极化态,可使单极化雷达具备一定的极化测量能力,在实现成本与调控可实现性等方面更具优势。此外,针对假目标的辨识问题,文献^[6]指出,对于有源欺骗干扰信号与目标回波的极化特征非常接近的情况,具有变极化能力的雷达将会获得更佳的辨识效果。文献^[13]的研究表明,当有限的极化态沿特定轨迹变化时,比如“大圆轨道”(极化态在Poincaré球上的分布轨迹为赤道线或穿过“南北极”的经度线),“小圆轨道”(极化态在Poincaré球上的分布轨迹为与赤道线平行或与经度线平行但不经过“南北极”的圆),可以实现良好的极化信息利用效果,有效提升雷达对抗能力。因此,将具有极化时变能力的变极化器用于干

扰辨识兼具高性能与低成本优势。

传统的变极化技术主要通过铁氧体移相器实现^[14,15],铁氧体移相器较为成熟,但其常用于较低的工作频段,且所需激励功率较大、响应速度较慢、体积较大、成本较高,不利于高速扫描和集成设计。近年来,超表面结构因其对电磁波幅度、相位和极化调控的灵活性,为变极化技术的发展提供了新思路,涌现出一批极化调控超表面相关的研究工作^[16-24]。在极化调控效果方面,集中表现为以下3种情况:一是将单一线极化转换为多线极化^[17-19],二是将线极化转换为圆极化^[18-20],三是将某一极化态转换为与其正交的极化态^[20-24]。其中,文献^[18-21]在超表面结构中加载了PIN二极管,通过控制二极管的通断,可以实现两类极化转换功能。但总的来讲,上述极化调控超表面仅实现了有限态的极化转换,同一种结构无法将入射波调控为各种形态(对应不同椭圆率角)、各种姿态(对应不同椭圆倾角)和不同极化旋向,可调极化态仅占Poincaré球表面的小部分,无法满足现代雷达对“任意极化”的要求,限制了其应用^[5,15]。值得一提的是,已有研究工作聚焦多极化态的调控^[25-29],文献^[26,27]先后提出了利用时间调控超表面进行任意极化态调控的方法,为多极化态的调控提供了有益的参考。然而,上述研究工作主要面向光学系统或通信系统,针对雷达对抗应用场景的极化调控技术有待进一步研究。

因此,本文从提升单极化雷达对有源欺骗干扰的辨识能力出发,研究了基于电磁超表面的极化时变调控方法与器件设计,在实现特定极化态按需调控的基础上,提出了一种极化轨道约束的有源欺骗干扰辨识方法,实现了干扰与目标之间的辨识。

2 基于相位调制编码的极化时变调控原理

极化调控的本质是控制电磁波两个正交极化分量的幅度比及相位差^[4]。因此,若要通过超表面实现任意极化调控,理论上需要设计出具有幅度与相位任意可调的超表面结构,这对结构设计具有极大的挑战性。东南大学崔铁军院士团队^[30,31]于2018年首次提出时间编码超表面的概念并将其用于实现相

位和幅度的联合调控，核心思想是，通过对相位进行周期编码可在频域产生谐波，谐波的产生转移了部分能量，达到“等效调控”幅度的效果，从而以相位调制编码实现幅度和相位的联合调控。

图1展示了利用相位调制表面实现极化时变调控的示意图，其核心组成为各向异性相位调制表面以及与两个极化通道相匹配的控制系统。其中，控制系统由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)与上位机组成。上位机根据极化调控需求生成周期相位调制编码序列，然后将编码序列传递至FPGA，FPGA控制两个极化通道的相位按照周期函数变化，通过改变正交极化分量之间的等效相位差和幅度比，实现极化态的按需调控。在单个极化态调控的基础上，不同极化态的控制信号以整周期为单位变化，可使反射波的极化态呈现时变效果。

经时变反射系数 $\Gamma(t)$ 调制后，雷达反射信号的频域表达式为

$$\mathbf{E}_r(f) = S(f) * \Gamma(f) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k S(f - kf_0) \quad (1)$$

其中， $\mathbf{E}_r(f)$ 、 $S(f)$ 分别为雷达反射信号和入射信号的频域表达式， k 为谐波阶数， f_0 为调制信号的频率， a_k 为时变反射系数的傅里叶级数，表示为

$$a_k = \sum_{n=1}^L \frac{\Gamma_n}{L} \text{sinc}\left(\frac{k\pi}{L}\right) \left(e^{-jk\pi \frac{2n-1}{L}}\right) \quad (2)$$

其中， L 为每个周期编码序列的长度， Γ_n 为第 n 个时隙内的反射系数，保持 $\Gamma_n = e^{j\varphi_n}$ 不变， φ_n 为第 n 个时隙的反射相位。

由式(1)可知，电磁波经周期相位调制编码调

制后，在频域产生了多阶谐波，且谐波的幅度、相位各不相同，在调控效果上表现为极化-频率联合调控。针对雷达抗干扰场景，本节重点关注雷达中心频点附近的极化调控效果，即对于基波信号的极化调控效果，由式(2)可得，基波处等效幅度与相位分别为

$$A_0 = \sum_{n=1}^L \frac{|\Gamma_n|}{L} \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \arg\left(\sum_{n=1}^L \frac{\Gamma_n}{L}\right) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知，经周期信号调制后得到的等效幅度、等效相位与周期信号编码序列长度 L 以及相位量化位数(相位量化取值)有关。图2分析了当周期编码序列长度 L 分别为6和10时，对于1 bit/2 bit/3 bit的相位调制编码超表面，正交极化通道之间等效幅度比与相位差的可能取值。取值覆盖范围越大，可调控得到的极化态越丰富，取值间隔越小，极化态调控精度越高，相邻两点之间的距离与编码序列长度成反比，比值为 $1/L$ 。由图2可知，通过相位周期编码，一方面可以实现对幅度和相位的联合调控，另一方面可以以低比特率实现高比特率的相位调控效果，提高极化调控的多样性和精度。因此，为实现任意极化调控效果，超表面应至少具备2 bit的相位调制能力，并结合极化调控精度需求选取合适的编码序列长度。

3 各向异性相位调制表面设计与分析

目前公开报道的具有极化调控能力的超表面通常仅对特定状态的入射电磁波产生响应^[8-17]，在雷

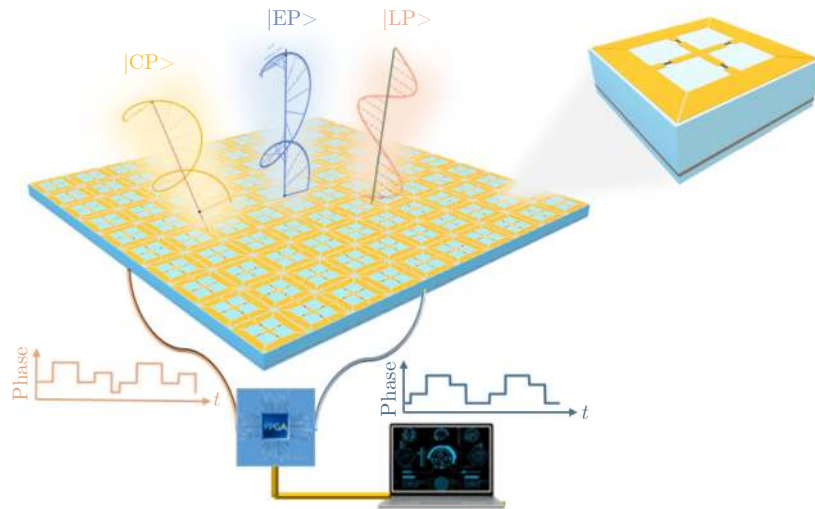


图1 基于相位调制编码的极化时变调控超表面及极化调控原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of time-varying polarization-converting metasurface based on phase-modulated coding and its mechanism of polarization modulation

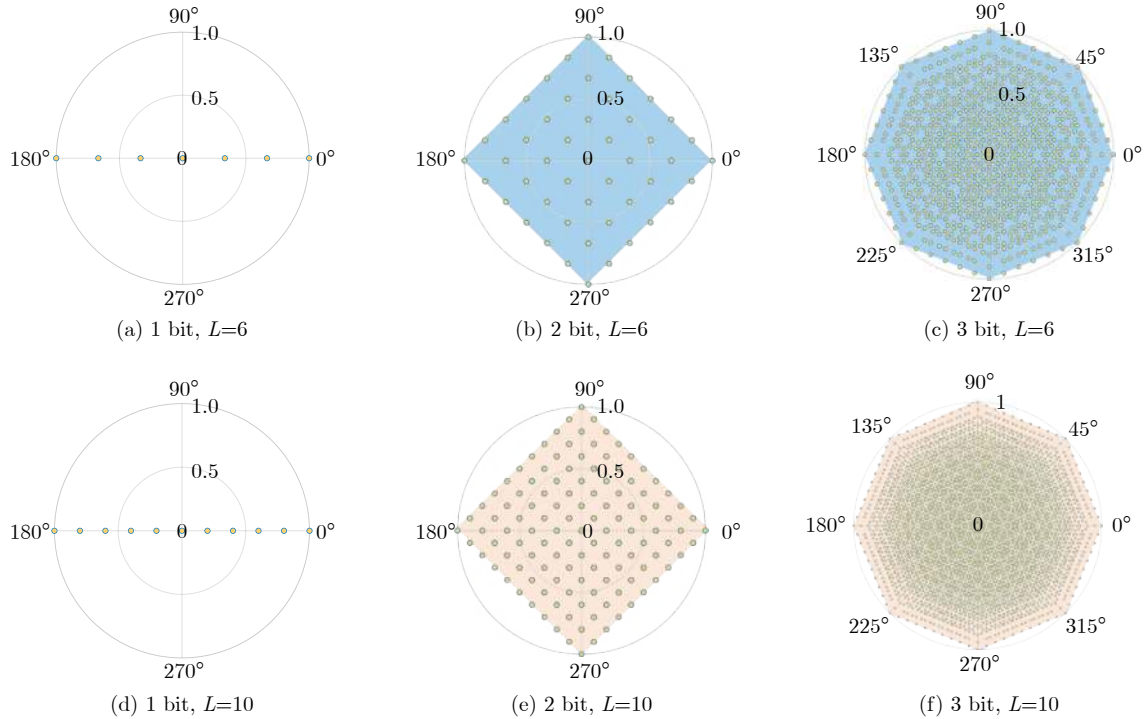


图2 不同相位量化位数及编码序列长度下, 等效反射系数幅/相分布图

Fig. 2 The amplitude-ratio and phase-difference distribution of the effective reflection coefficients with different coding bits and coding lengths

达应用场景中具有较大的局限性。为提升超表面对电磁波极化态的调控能力以及宽角域稳定性, 本节在相位调制超表面设计过程中, 采用各向异性结构形式以提高对电磁波正交极化分量的独立调控能力^[26,27,32], 采用小型化设计方法以提高对宽角域入射波的响应能力^[33]。超表面单元结构如图3所示, 由3层金属结构、两层介质基板(F4B, 介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗角正切 $\tan\delta = 0.001$), 一层介质粘合层(FR4, $\epsilon_r = 4.3$, $\tan\delta = 0.025$)以及贯穿各层之间的金属化过孔构成。顶层金属结构由“+”字金属贴片及其周围4个对称分布的“T”形金属贴片组成, 4个“T”形金属贴片与中心的“+”字金属贴片形成了4个缝隙, 可等效为电容。为实现单元等效电路参数可调, 在4个缝隙中加载了4个变容二极管, 型号为MA46H120^[34]。通过独立调控水平极化和垂直极化方向变容二极管的电容值, 可以实现对正交极化通道反射相位的独立调控。在谐振结构对称设计的基础上, 采用了分层馈电的方式, 提高了正交极化通道之间的隔离度。在小型化设计方面, 金属贴片设计为“T”形可以有效地避免4条金属臂之间出现交叉混叠, 能够在较小的单元上排布更长的谐振结构, 获得较大的等效电感, 提高超表面反射性能的宽角域稳定性。

图4直观展示了所设计的相位调制表面的反射

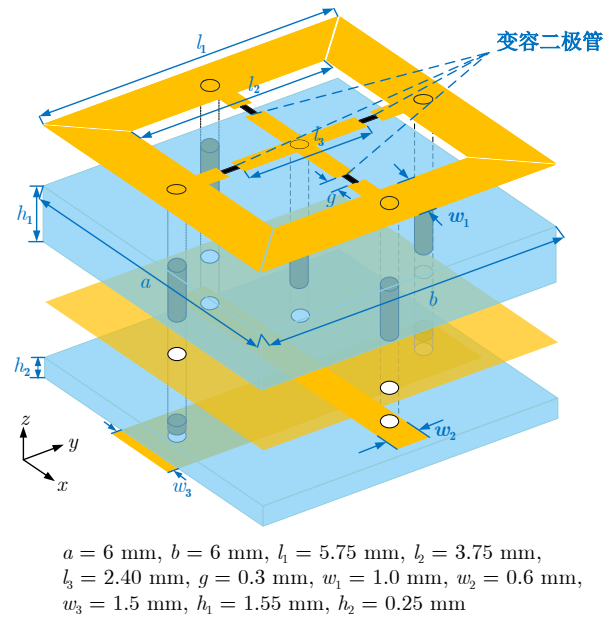


图3 各向异性相位调制表面单元的三维拓扑结构图及详细几何参数

Fig. 3 3D topology expanded view of the anisotropy phase-modulated metasurface unit cell with the detailed geometric parameters

系数, 当垂直极化或水平极化的入射波单独照射超表面时, 相应极化通道的反射相位被调制, 因此, 对于任意极化入射波, 其水平极化分量和垂直极化

分量均可被独立调制。由图4(a)与图4(c)可见,在不同偏置电压的激励下,反射波的幅度基本保持在 -1 dB以上,说明反射率基本在90%以上,可认为入射波被全反射。由图4(b)与图4(d)可见,反射相位随着偏置电压的改变,表现出较大的差异性,具体表现为,当变容二极管两端的偏置电压在 $0\sim 15$ V变化时,可调反射相位的差值在 $0\sim 320^\circ$,其中, $9.2\sim 12.0$ GHz时可调反射相位的差值保持在 180° 以上,且在 $9.6\sim 10.1$ GHz频带内达到 315° ,最高可支持 3 bit相位调制编码。根据第2节中等效幅相分析结果可知,相较文献[26–29]中设计的1 bit/2 bit相位调制超表面,本节所设计的3 bit超表面经相位调制编码后可实现更丰富的极化调控效果。

为进一步考察相位调制超表面的宽角域稳定性,图5分析了不同入射角照射下,超表面反射相位的变化情况。由图5可见,对于水平极化通道和垂直极化通道而言,入射角的改变主要对10.4 GHz以上频段的反射相位有影响,反射相位较正入射情况下产生一定的偏移,且随着入射角的增大,偏移越明

显。当入射角增大至 45° 时,在 $9.6\sim 10.1$ GHz频带内,相位偏移量可控制在 5° 以内,具有良好的角度稳定性。这与单元的小型化设计有直接关系,小型化设计有利于在有限大的尺寸内排布更多的超表面单元结构,使每个单元处于近似周期边界的环境中,使有限大超表面的性能更逼近无限大结构的理想电磁特性。

为方便后续相位调制编码设计,以偏置电压为0 V时对应的反射相位为参照,得到3 bit量化相位对应的偏置电压值,如表1所示。

4 基于极化时变轨道约束的干扰辨识方法

4.1 信号模型

通过在雷达天线上加装极化调控装置,可使单极化天线的发射和接收具备一定的变极化能力。一般情况下,干扰机的接收天线和发射天线的极化方式固定,无法对入射波的变极化产生响应。而对于目标而言,其本身具有“变极化效应”,因此,经过目标散射后电磁波的极化态与入射电磁波的极化

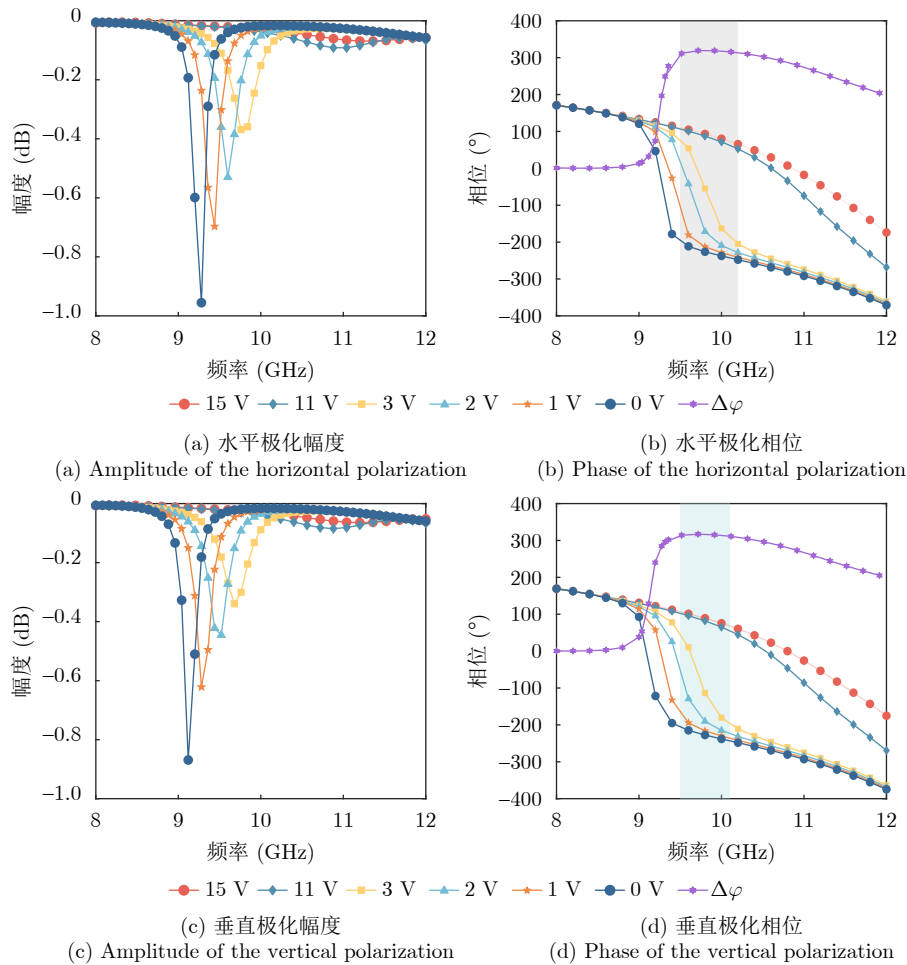


图4 相位调制表面各极化通道反射特性仿真分析

Fig. 4 Simulated reflection characteristics of each polarization channel of the phase-modulated metasurface

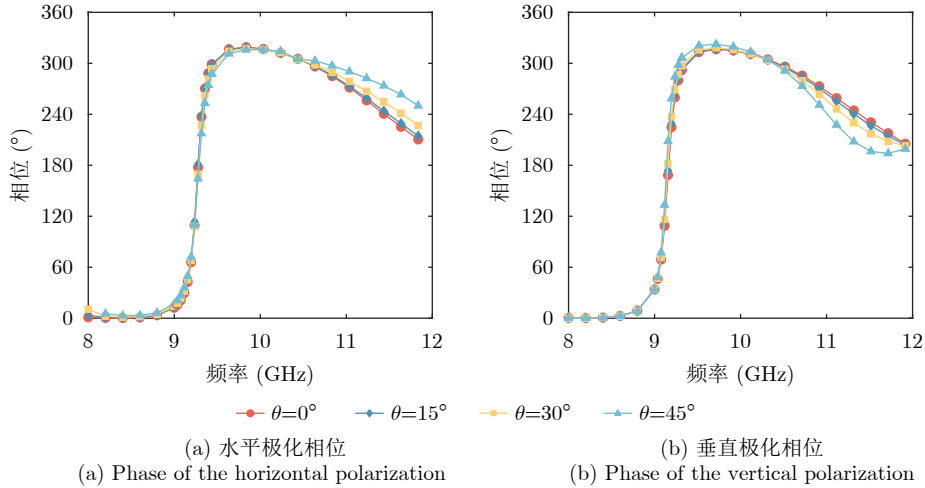


图 5 不同角度入射波照射下相位调制表面反射相位稳定性分析

Fig. 5 Phase stability analysis of the metasurface for different incidence angles

表 1 3 bit 量化相位及偏置电压对应关系

Tab. 1 Corresponding relationship between 3 bit quantization phase and bias voltage

水平极化		垂直极化	
V_{DC} (V)	$\Delta\varphi$ (°)	V_{DC} (V)	$\Delta\varphi$ (°)
0	0	0	0
2.6	45	2.7	45
3.2	89	3.5	90
3.5	135	4.5	135
3.9	180	4.6	179
4.5	226	5.1	225
6.0	270	7.0	270
14.0	315	15.0	314

态一一对应。根据上述分析可知, 雷达接收到的干扰回波与目标回波蕴含不同的变极化响应, 利用变极化响应的差异性可以实现两者的辨别。

假设雷达天线的辐射场为 E , 经极化时变调控超表面(下文统称为变极化器)调控后, 其电场的水平极化分量为 $A_{xx}(t)e^{j\varphi_{xx}(t)}$, 垂直极化分量为 $A_{yy}(t)e^{j\varphi_{yy}(t)}$ 。考虑雷达收发天线和干扰机天线均为 45° 线极化天线。假设天线输出信号为 $s(t)$, 在不考虑距离衰减的条件下, 经过变极化器调控后信号的水平极化分量为

$$s_x(t) = \frac{A_{xx}(t)e^{j\varphi_{xx}(t)}}{E} s(t) \quad (5)$$

同理, 经过变极化器后垂直极化分量为

$$s_y(t) = \frac{A_{yy}(t)e^{j\varphi_{yy}(t)}}{E} s(t) \quad (6)$$

其中, $A_{xx}(t)e^{j\varphi_{xx}(t)}/E$ 和 $A_{yy}(t)e^{j\varphi_{yy}(t)}/E$ 为极化调制因子。

下面分析经过目标散射以及干扰机转发后进入雷达接收机的回波信号, 令目标的极化散射矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{yx} \\ S_{xy} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

经过目标散射后, 散射回波为

$$\begin{bmatrix} s_{rx}(t) \\ s_{ry}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{yx} \\ S_{xy} & S_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x(t) \\ s_y(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

回波同样会经过变极化器后到达雷达接收天线, 根据天线互易性原理, 两路极化信号经过变极化器后矢量叠加。因此, 雷达接收的目标信号为

$$\begin{aligned} s_{\text{ref}}(t) &= \begin{bmatrix} \frac{A_{xx}(t)e^{j\varphi_{xx}(t)}}{E} & \frac{A_{yy}(t)e^{j\varphi_{yy}(t)}}{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{rx}(t) \\ s_{ry}(t) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{A_{xx}(t)e^{j\varphi_{xx}(t)}}{E} & \frac{A_{yy}(t)e^{j\varphi_{yy}(t)}}{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{yx} \\ S_{xy} & S_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{A_{xx}(t)e^{j\varphi_{xx}(t)}}{E} \\ \frac{A_{yy}(t)e^{j\varphi_{yy}(t)}}{E} \end{bmatrix} s(t) \quad (9) \end{aligned}$$

对于有源欺骗干扰而言, 接收机通过侦查天线接收来自雷达的信号 $s(t)$, 经过对波形参数测量、调制后生成干扰信号, 由干扰机饱和放大并发射。此时干扰信号仅继承了 $s(t)$ 的波形信息, 而极化调制特征将被显著削弱。按照脉冲等功率发射模式, 则由干扰机转发的各个脉冲为恒模信号, 记为 $j(t)$ 。干扰信号同样会经过变极化器才能到达雷达天线, 根据天线互易性原理, 雷达接收到的干扰信号为

$$s_{\text{jam}}(t) = \begin{bmatrix} \frac{A_{xx}(t)e^{j\varphi_{xx}(t)}}{E} & \frac{A_{yy}(t)e^{j\varphi_{yy}(t)}}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} j(t) \quad (10)$$

将雷达天线发射和接收的变极化响应表示为 $h(t)$ 。由于变极化响应体现在不同脉冲之间幅/相的变化上, 首先对干扰信号和目标回波进行脉冲压缩处理, 考察不同脉冲间脉压结果 $y_{\text{jam}}(t)$ 和 $y_{\text{ref}}(t)$ 。然后将变极化响应与脉压结果进行相关性分析, 分别求 $y_{\text{jam}}(t)$ 和 $y_{\text{ref}}(t)$ 与 $h(t)$ 的互相关函数。更进一步的, 考虑到目标散射结构对回波的影响以及雷达与目标间的相对运动等因素, 发射时的变极化响应和接收时的变极化响应将表现出偏移的特点, 具体而言, 变极化响应表现为时间的函数。因此, 需要进一步考察不同接收时刻变极化响应与回波信号的相关函数。为此, 定义两种相关特征参数:

峰值相关特征参数

$$C_{\max} = \max R_{yh}(\tau) = \max \int_0^T y(t)h(t-\tau)dt \quad (11)$$

积分相关特征参数

$$C_{\text{int}} = \int_0^T R_{yh}(\tau)dt = \int_0^T \int_0^T y(t)h(t-\tau)dtdt \quad (12)$$

其中, T 表示一组极化态的遍历周期。

利用峰值相关特征参数和积分相关特征参数进行表征, 并对两种相关特征参数进行归一化处理, 提取干扰信号与目标回波的特征差异, 实现对目标和干扰的辨识。

通过分析特定极化轨道约束下回波信号模型, 可得到基于极化时变调控的有源欺骗干扰辨识方法如下: ①在变极化器的调控下使雷达天线发射和接收同时变极化; ②雷达接收回波脉冲串; ③对接收信号作脉冲压缩运算; ④提取每个脉冲的脉压输出峰值点构成回波响应; ⑤将回波响应与天线变极化响应作相关处理; ⑥利用峰值相关特征参数和积分相关特征参数进行特征表征; ⑦完成目标信号和干扰信号辨别。

4.2 极化时变轨道调控

以反射式单极化雷达天线为例, 将变极化器加装在天线反射面上, 通过对变极化器进行相位调制编码, 反射波极化态可沿特定轨道变化。因此, 雷达天线与变极化器共同构成新的变极化天线, 具备发射和接收变极化的能力。为获取更多的极化信息, 极化轨道应包含丰富的极化态, 假定极化轨道包含160种不同的极化态, 每种极化态由一组周期编码序列调控得到, 且各极化态的调控周期相等, 设置为10 μs , 每组调控序列重复10个整周期后切换至下一组编码序列。下面以某一左旋椭圆极化 $(\tau, \phi) = (35^\circ, 45^\circ)$ 为例, 对周期编码方法进行详细说明。

根据文献[27]极化调控相关理论可知, 若将入射波调控至任意极化态 (τ, ϕ) , 相位调制编码超表面的等效幅度比与等效相位差需满足

$$\frac{|A_{xx}|}{|A_{yy}|} = \frac{|E_x^i \eta_y|}{|E_y^i \eta_x|} \quad (13)$$

$$\varphi_{yy} - \varphi_{xx} = \{\arg(\eta_y) - \arg(\eta_x)\} + \{\arg(E_x^i) - \arg(E_y^i)\} \quad (14)$$

其中, τ 与 ϕ 为极化椭圆参数, 分别表示椭圆率角与椭圆倾角; E_x^i, E_y^i 分别表示入射波的水平极化分量和垂直极化分量; A_{xx}, A_{yy} 分别表示水平极化通道和垂直极化通道的等效反射幅度; $\varphi_{xx}, \varphi_{yy}$ 分别表示水平极化通道和垂直极化通道的等效反射相位; η_x, η_y 分别表示反射波的水平极化分量 $|H\rangle$ 和垂直极化分量 $|V\rangle$, 与极化椭圆参数 τ, ϕ 之间存在式(15)所示关系

$$\begin{bmatrix} \eta_x \\ \eta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \tau \\ j \sin \tau \end{bmatrix} \quad (15)$$

对于3 bit相位调制表面, 量化相位有以下8种状态 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ)$, 构造编码序列长度为10的时间序列分别调控水平极化通道和垂直极化通道。不失一般性, 假设入射波为 45° 线极化, 根据式(13)与式(14)计算可得, 水平极化波和垂直极化波反射系数的幅度比与相位差需满足 $|A_{xx}|/|A_{yy}| = 1, \varphi_{yy} - \varphi_{xx} = 70^\circ$ 。

结合表1中仿真相位与电压的对应关系, 构造如图6(a)所示的相位调制编码序列以及相应的偏置电压序列, 根据傅里叶变换可知, 水平极化分量与垂直极化分量对应的等效反射系数分别为 $\Gamma_{xx} = 0.68 - j0.48, \Gamma_{yy} = 0.68 + j0.48$, 计算得到该组反射系数幅度比与相位差分别为 $|A_{xx}|/|A_{yy}| = 1, \varphi_{yy} - \varphi_{xx} = 70.53^\circ$, 则经其调控后得到的反射波极化态为 $(\tau, \phi) = (35.26^\circ, 45^\circ)$, 与目标极化态基本一致。采用同样的方法构建反射波为左旋圆极化时对应的相位调制编码序列及偏置电压序列如图6(b)所示, 经调控后得到的反射波极化态为 $(\tau, \phi) = (45^\circ, 45^\circ)$, 与目标极化态一致。

在有源欺骗干扰辨识应用中, 变极化响应是有效识别干扰与目标的关键。采用特定的极化时变轨道, 一方面可以使目标与干扰之间的极化特征差异蕴含一定的规律性, 从而提高辨识能力, 另一方面有利于雷达接收端作匹配接收, 便于后续干扰抑制处理。为获得沿特定轨道变化的极化调控效果, 首先按照目标极化轨道计算得到极化椭圆表征下各极化态的椭圆率角 τ 与椭圆倾角 ϕ , 然后采用上述单

个极化态的调控方法计算出每个极化态所需的等效幅度和相位,以此构造反射相位的周期编码序列以及相应的偏置电压,最后,将各极化态对应的周期编码序列进行综合,不同的极化态随时间变化形成具有特定轨迹的极化轨道。图7为基于极化时变调控超表面得到的3条极化轨道,分别为“大圆”轨道、过南北极的“8”字轨道以及未经南北极的“8”字轨道。此处设计的“大圆”轨道为经过 45° 线极化的经度线,所包含的极化态之间仅存在相位差异;“8”字极化轨道依次穿过Poincaré球上的各个象限,蕴含丰富的相位和幅度信息,可在干扰与目标之间引入较为显著的极化差异。

4.3 仿真分析

考虑雷达发射线性调频信号,信号重复周期为 $100\ \mu\text{s}$,脉宽为 $40\ \mu\text{s}$,带宽为 $30\ \text{MHz}$,采样总时间为 $40\ \text{ms}$ 。通过相位调制编码调控极化态沿4.2节设计的极化轨道变化,每条极化轨道包含160种不

同的极化态,每个极化态的切换时间间隔为 $100\ \mu\text{s}$,因此,天线发射信号以及接收到的信号将表现为脉间极化调制。根据式(7)—式(10)分别对目标回波与干扰回波进行建模仿真,然后对雷达接收信号作脉冲压缩,并将脉压结果与天线变极化响应作相关性处理,在此基础上利用峰值相关特征参数和积分相关特征参数进行特征表征,完成目标与干扰的辨别。

图8(a)展示了“大圆”极化轨道约束下,有源欺骗干扰信号与目标信号的脉冲压缩处理结果,由图中变化曲线可知,干扰信号和目标回波的脉压结果均呈现周期性起伏变化,而且干扰信号的脉压输出与目标回波信号的脉压输出无论是在变化趋势上还是幅度上都表现出高度的相似性,仅从脉压结果来看,很难将干扰与目标区别开。

结合变极化器对回波信号的调制机理,将变极化器的变极化响应分别与干扰信号、目标回波信号的脉压结果作相关处理。事实上,经过变极化器

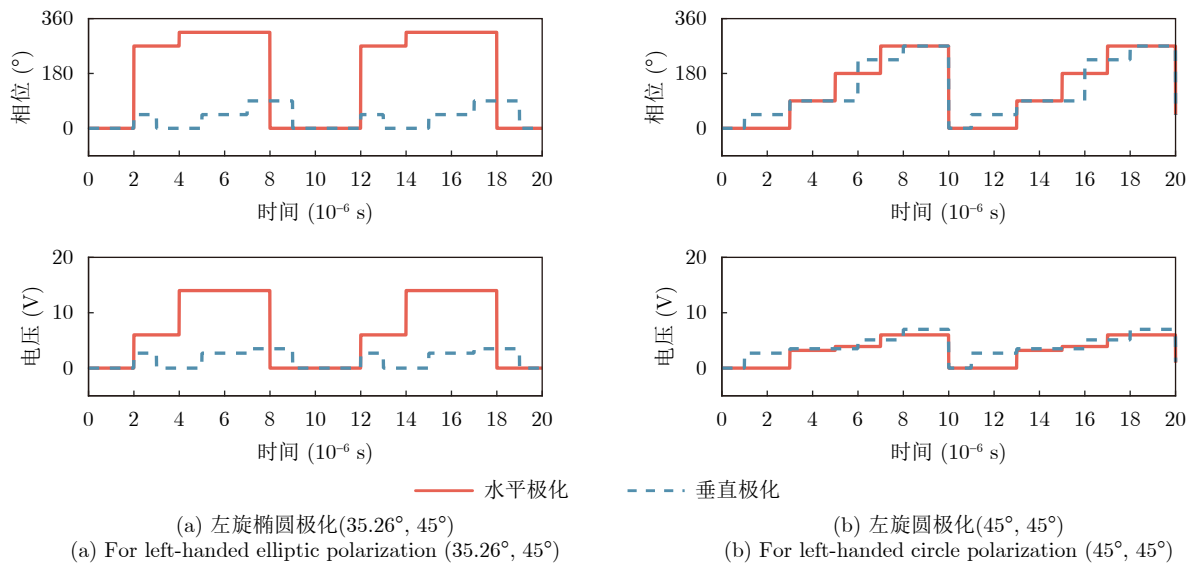


图6 两种特定极化态对应的相位调制编码序列及偏置电压编码序列(入射波为 45° 线极化)

Fig. 6 Coding sequence for the specific polarization states (with 45° linear polarization incidence)

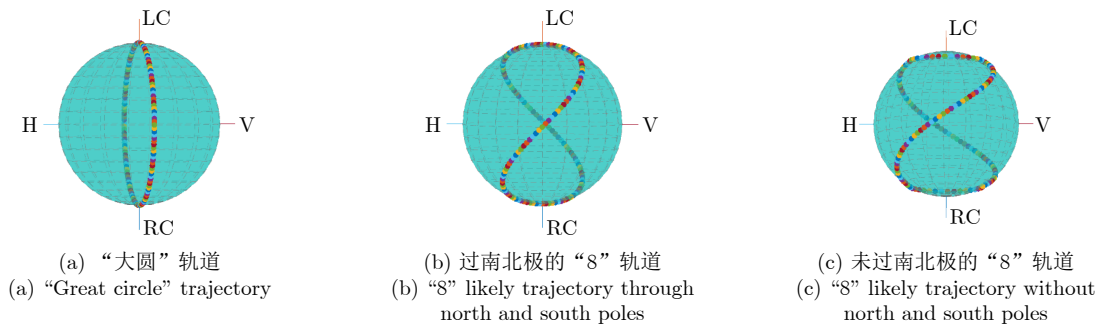


图7 基于极化时变调控方法调控得到的3条极化轨道在Poincaré球上的分布

Fig. 7 The distribution of three polarization trajectories on Poincaré sphere generated by the method proposed in this paper

后,通常转发干扰信号是对发射信号的复制和转发,不改变电磁波的极化态,因此,理论上相关性更高;而目标回波是发射信号照射目标并反射回接收天线中的信号,在此过程中发射信号经过两次极化调制,相关性受到了削弱,将有所降低。仿真结果如图8(b)所示,相比于目标回波脉压结果与变极化响应的相关函数值,干扰信号脉压结果与变极化响应的相关函数值更高,且峰值特征更明显。由此可见,利用干扰信号与目标信号受到变极化器调制次数的不同,可以将两者很好地区分。

进一步的,对于动态目标而言,回波信号进入接收天线的时间是不断变化的,此时,我们考察不同接收时刻变极化响应与回波信号的相关函数。通过峰值相关特征参数 $C_{\max}$ 、积分相关特征参数 C_{int} 来表征,如图8(c)所示。结果表明,不同接收时刻下干扰和目标的相关特征参数有显著聚类效应。

为了进一步说明极化时变调控技术在有源欺骗

干扰辨识中的有效性,图9和图10分别展示了极化态沿两种“8”字极化轨道变化时干扰信号与目标信号的特征分布。结合图8的分析结果可见,在不同的极化轨道调控下,虽然引入了幅度和相位扰动,但仅通过脉冲压缩处理结果无法辨识干扰与目标。而通过将脉冲压缩处理结果与变极化响应作相关处理,可进一步放大目标与干扰之间的差异性,从而实现两者之间的辨识。

由图9(a)的脉冲压缩处理结果可以发现,当极化轨道包含Poincaré球上南北极附近区域的极化态时,随着极化态的变化,不同脉冲的脉压输出峰值有较明显的衰减,在一定程度上不利于雷达探测,图8(a)中也存在类似现象。然而,如图10所示,采用未过南北极的“8”字轨道调控时,不同极化态对应的脉压输出峰值之间幅度变化显著缩小,峰值增益下降问题有效改善。上述结论可用于指导极化轨道优化设计。

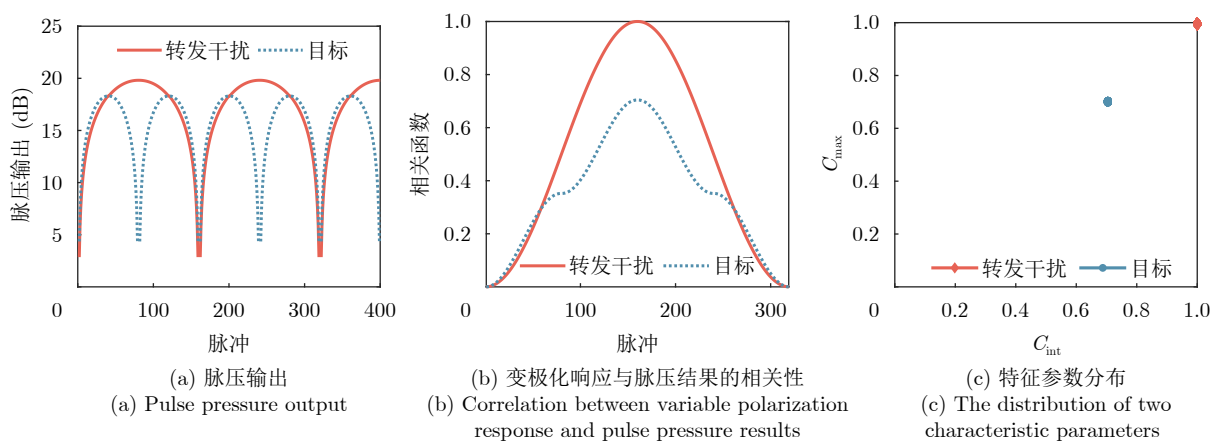


图8 “大圆”轨道约束下的有源欺骗干扰与目标回波的极化域特征分布

Fig. 8 Polarization domain characteristics of the target signal and the active detection jamming under the constraint of “great circle” trajectory

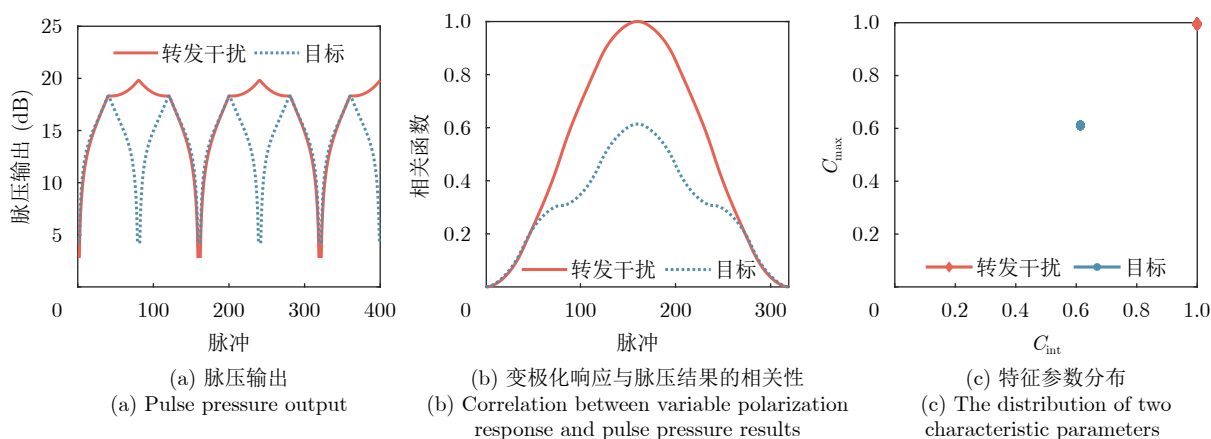


图9 “8”字轨道(过南北极)约束下的有源欺骗干扰与目标回波的极化域特征分布

Fig. 9 Polarization domain characteristics of the target signal and the active detection jamming under the constraint of “8” likely trajectory through north and south poles

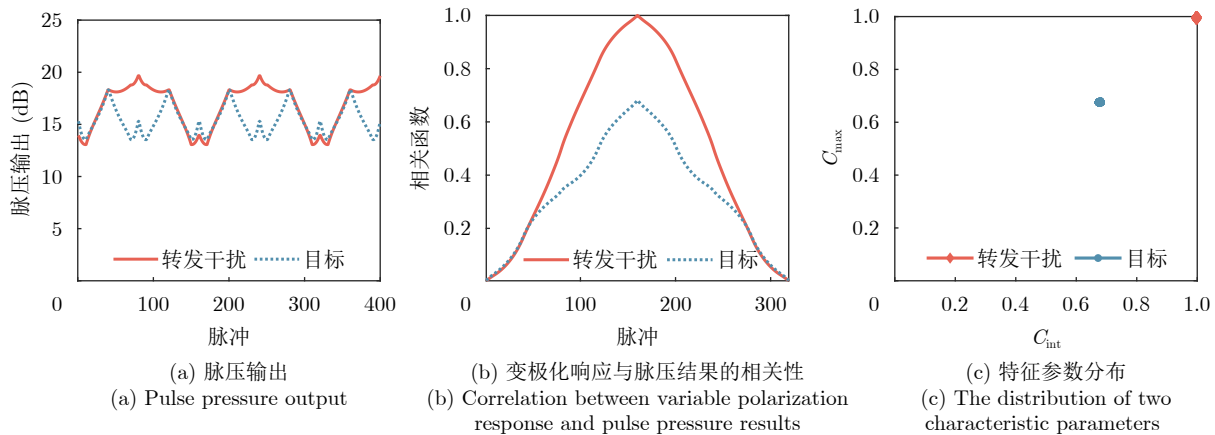


图 10 “8”字轨道(未过南北极)约束下的有源欺骗干扰与目标回波的极化域特征分布

Fig. 10 Polarization domain characteristics of the target signal and the active detection jamming under the constraint of “8” likely trajectory without north and south poles

5 结语

本文立足于雷达极化抗干扰应用需求,设计了一套各向异性相位调制超表面,通过相位调制周期编码设计,实现了对特定极化轨道的按需调控。在极化时变调控的基础上,提出了一种特定极化轨道约束的有源欺骗干扰辨识方法。通过在单极化天线口面加装变极化器,调控变极化器的反射相位,使天线发射和接收极化态按照特定极化轨道变化,利用目标与有源欺骗干扰对雷达变极化响应的不同,提取两者在极化域的特征差异,实现干扰辨识。针对极化时变带来的发射和接收极化不同步的问题,构造了峰值相关特征参数与积分相关特征参数,使目标与干扰呈现稳定的聚类效应。仿真分析表明,在不同极化轨道约束下,通过特征提取与分析,均可利用极化特征差异实现干扰与目标的有效辨识。本文所研究的基于极化时变调控表面的有源欺骗干扰辨识方法,为极化抗干扰应用提供了一种高效、低成本的技术途径。

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] ROOME S J. Digital radio frequency memory[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1990, 2(4): 147.
- [2] 曹旭源. 基于DRFM的雷达干扰技术研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2013: 5–19.
CAO Xuyuan. Research on jamming against radar based on digital radio frequency memory[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2013: 5–19.
- [3] 高佳旭. 雷达信号有源干扰技术研究及实现[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2021: 13–18.
GAO Jiaxu. Research and realization of radar signal active jamming technology[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2021: 13–18.
- [4] 肖顺平, 徐振海, 代大海, 等. 雷达极化技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022: 1–51.
XIAO Shunping, XU Zhenhai, DAI Dahai, *et al.* Radar Polarization Techniques[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022: 1–51.
- [5] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2016, 5(2): 119–131. doi: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
WANG Xuesong. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 119–131. doi: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
- [6] 施龙飞, 马佳智, 庞晨, 等. 极化雷达信号处理与抗干扰技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 1–13.
SHI Longfei, MA Jiazhì, PANG Chen, *et al.* Signal Processing and Anti-interference Techniques for Polarimetric Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 1–13.
- [7] 马佳智, 施龙飞, 徐振海, 等. 单脉冲雷达多源参数估计与抗干扰技术进展[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 125–139. doi: [10.12000/JR18093](https://doi.org/10.12000/JR18093).
MA Jiazhì, SHI Longfei, XU Zhenhai, *et al.* Overview of multi-source parameter estimation and jamming mitigation for monopulse radars[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 125–139. doi: [10.12000/JR18093](https://doi.org/10.12000/JR18093).
- [8] 施龙飞, 任博, 马佳智, 等. 雷达极化抗干扰技术进展[J]. 现代雷达, 2016, 38(4): 1–7, 29. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001).
SHI Longfei, REN Bo, MA Jiazhì, *et al.* Recent developments of radar anti-interference techniques with polarimetry[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(4): 1–7, 29. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001).

- [9] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于IPPV的真假目标极化鉴别算法[J]. 现代雷达, 2004, 26(9): 38–42. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2004.09.011](#).
LI Yongzhen, WANG Xuesong, XIAO Shunping, *et al.* A new polarization discrimination algorithm for active decoy and radar target based on IPPV[J]. *Modern Radar*, 2004, 26(9): 38–42. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2004.09.011](#).
- [10] 施龙飞, 王雪松, 肖顺平. 转发式假目标干扰的极化鉴别[J]. 中国科学 F辑: 信息科学, 2009, 39(4): 468–475.
SHI Longfei, WANG Xuesong, and XIAO Shunping. Polarization discrimination between repeater false-target and radar target[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 39(4): 468–475.
- [11] ZONG Zhiwei, SHI Longfei, LI Yongzhen, *et al.* Detection-discrimination method for multiple repeater false targets based on radar polarization echoes[J]. *Radioengineering*, 2014, 23(1): 104–110.
- [12] 施龙飞, 帅鹏, 王雪松, 等. 极化调制假目标干扰的鉴别[J]. 信号处理, 2008, 24(6): 894–899. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2008.06.002](#).
SHI Longfei, SHUAI Peng, WANG Xuesong, *et al.* Polarization discrimination between modulation polarization decoy and radar target[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(6): 894–899. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2008.06.002](#).
- [13] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. [博士学位], 国防科学技术大学, 1999: 21–26, 127–179.
WANG Xuesong. Study on wide-band polarization information processing[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 1999: 21–26, 127–179.
- [14] 蒋仁培, 苏丽萍. 雷达极化问题和铁氧体变极化技术[J]. 现代雷达, 2001, 23(1): 65–69, 72. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2001.01.014](#).
JIANG Renpei and SU Liping. Problem of radar polarization and technique of ferrite variable polarization[J]. *Modern Radar*, 2001, 23(1): 65–69, 72. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2001.01.014](#).
- [15] 蒋仁培, 苏丽萍, 魏克珠. 广义铁氧体变极化理论[J]. 微波学报, 2000, 16(4): 336–342. doi: [10.3969/j.issn.1005-6122.2000.04.002](#).
JIANG Renpei, SU Liping, and WEI Kezhu. Generalized theory of ferrite variable polarization[J]. *Journal of Microwaves*, 2000, 16(4): 336–342. doi: [10.3969/j.issn.1005-6122.2000.04.002](#).
- [16] KARAMIRAD M, GHOBADI C, and NOURINIA J. Metasurfaces for wideband and efficient polarization rotation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(3): 1799–1804. doi: [10.1109/TAP.2020.3012828](#).
- [17] WANG Yidan, SHI Hongyu, CHEN Juan, *et al.* Digital polarization programmable metasurface for continuous polarization angle rotation and radar applications[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 931868. doi: [10.3389/fmats.2022.931868](#).
- [18] TIAN Jianghao, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* A reconfigurable ultra-wideband polarization converter based on metasurface incorporated with PIN diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(13): 135105. doi: [10.1063/1.5067383](#).
- [19] YANG Zhengyi, KOU Na, YU Shixing, *et al.* Reconfigurable multifunction polarization converter integrated with PIN diode[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, 31(6): 557–560. doi: [10.1109/LMWC.2021.3064039](#).
- [20] YANG Heng, WANG Shicong, LI Peng, *et al.* A broadband multifunctional reconfigurable polarization conversion metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(7): 5759–5767. doi: [10.1109/TAP.2023.3266498](#).
- [21] LI You, WANG Yi, and CAO Qunsheng. Design of a multifunctional reconfigurable metasurface for polarization and propagation manipulation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 129183–129191. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2939200](#).
- [22] CERVENY M, FORD K L, and TENNANT A. Reflective switchable polarization rotator based on metasurface with PIN diodes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(3): 1483–1492. doi: [10.1109/TAP.2020.3026883](#).
- [23] LIN Baoqin, GUO Jianxin, LV Lintao, *et al.* Ultra-wideband and high-efficiency reflective polarization converter for both linear and circular polarized waves[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(2): 76. doi: [10.1007/s00339-018-2368-9](#).
- [24] HAO Jiaming, YUAN Yu, RAN Lixin, *et al.* Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6): 063908. doi: [10.1103/PhysRevLett.99.063908](#).
- [25] WANG Shuai, DENG Zilan, WANG Yujie, *et al.* Arbitrary polarization conversion dichroism metasurfaces for all-in-one full Poincaré sphere polarizers[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 24. doi: [10.1038/s41377-021-00468-y](#).
- [26] KE Junchen, DAI Junyan, CHEN Mingzheng, *et al.* Linear and nonlinear polarization syntheses and their programmable controls based on anisotropic time-domain digital coding metasurface[J]. *Small Structures*, 2021, 2(1): 2000060. doi: [10.1002/sstr.202000060](#).
- [27] HU Qi, CHEN Ke, ZHANG Na, *et al.* Arbitrary and dynamic Poincaré sphere polarization converter with a time-varying metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(4): 2101915. doi: [10.1002/adom.202101915](#).

[28] ZHANG Xinge, YU Qian, JIANG Weixiang, *et al.* Polarization-controlled dual-programmable metasurfaces[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(11): 1903382. doi: [10.1002/adv.201903382](https://doi.org/10.1002/adv.201903382).

[29] 胡琪, 陈克, 郑依琳, 等. 时变极化编码表面及其在无线通信中的应用[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 304–312. doi: [10.12000/JR21042](https://doi.org/10.12000/JR21042).

HU Qi, CHEN Ke, ZHENG Yilin, *et al.* Time-varying polarization-converting programmable metasurface and its application in wireless communication system[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 304–312. doi: [10.12000/JR21042](https://doi.org/10.12000/JR21042).

[30] 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: 90.

[31] 戴俊彦. 时域超表面理论研究与应用[D]. [博士学位], 东南大学, 2019: 41.

DAI Junyan. Research and application of time-domain metasurface[D]. [Ph.D. dissertation], Southeast University, 2019: 41.

[32] 程强, 崔铁军. 电磁超材料[M]. 南京: 东南大学出版社, 2022: 259–262.

CHENG Qiang and CUI Tiejun. *Metamaterials*[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2022: 259–262.

[33] SUN Guang, WANG Junjie, XING Shiqi, *et al.* A flexible conformal multifunctional time-modulated metasurface for radar characteristics manipulation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023: 1–15. doi: [10.1109/TMTT.2023.3337646](https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3337646).

[34] MACOM. MA46H120 varactor datasheet[EB/OL]. <https://www.macom.com/products/product-detail/MA46H120>.

作者简介

陈 焱, 博士生, 主要研究方向为极化调控技术、雷达对抗技术。

王占领, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为极化阵列雷达及对抗技术。

庞 晨, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达极化信息处理、雷达抗干扰与识别技术。

李永祯, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达极化信息处理、空间电子对抗、目标检测与识别。

王 壮, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达信息处理、空间目标监视、自动目标识别。

(责任编辑: 于青)