

电控时变电磁材料的SAR成像特性研究

王俊杰*^① 冯德军*^① 王志淞^② 邢世其^① 李永祯^① 王雪松^①

^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(中国人民解放军32200部队 锦州 121000)

摘 要: 微动目标因具有在不同方向的运动分量,能够对电磁波进行微多普勒调制,导致目标成像特征出现方位向散焦效应,这种现象在目标识别与反识别领域被广泛关注与研究。相较而言,电控时变电磁材料通过外加激励实现对电磁波特征的灵活调控,具有更快的调制速度,而其成像特性没有被过多关注。该文以此为切入点,对电控时变电磁材料的合成孔径雷达(SAR)图像距离向调制特性进行了研究,分析了时变电磁材料谱变换模型和SAR目标特征控制原理。以相位调制表面(PSS)为代表,建立了非周期PSS相位调制模型,其频谱具有连续频移特性。在此基础上,探讨了PSS连续频移调制对SAR的影响,揭露了距离向目标散焦现象。通过SAR实测数据仿真,验证了所提理论方法的有效性。

关键词: 时变电磁材料; 相位调制表面; 非周期调制; 谱变换; 合成孔径雷达

中图分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)06-0865-09

DOI: 10.12000/JR21104

引用格式: 王俊杰, 冯德军, 王志淞, 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. doi: 10.12000/JR21104.

Reference format: WANG Junjie, FENG Dejun, WANG Zhisong, *et al.* Synthetic aperture rader imaging characteristics of electronically controlled time-varying electromagnetic materials[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(6): 865–873. doi: 10.12000/JR21104.

Synthetic Aperture Rader Imaging Characteristics of Electronically Controlled Time-varying Electromagnetic Materials

WANG Junjie*^① FENG Dejun*^① WANG Zhisong^② XING Shiqi^①
LI Yongzhen^① WANG Xuesong^①

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

^②(*Unit 32200 of PLA, Jinzhou 121000, China*)

Abstract: Micromotion targets can enable microDoppler modulation on electromagnetic waves owing to their motion components in different directions, resulting in the defocusing effects of the target imaging features along the azimuth direction. This phenomenon has been widely considered and investigated in target recognition and antirecognition. As a research hotspot, electronically controlled time-varying electromagnetic materials have fast modulation characteristics; however, their imaging characteristics have not received much attention. This study investigates the Synthetic Aperture Radar (SAR) modulation characteristics along the range direction of electronically controlled time-varying electromagnetic materials. Then, this study establishes the time-varying electromagnetic material spectrum transformation model and analyzes the SAR target characteristic control principle. Taking the Phase-Switched Screen (PSS) as an example, a nonperiodic PSS

收稿日期: 2021-07-22; 改回日期: 2021-10-14; 网络出版: 2021-11-04

*通信作者: 王俊杰 wangjunjie14@vip.qq.com; 冯德军 fdj117@sina.com

*Corresponding Author: WANG Junjie, wangjunjie14@vip.qq.com; FENG Dejun, fdj117@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(62071475, 61890542, 62001481)

Foundation Items: The National Nature Science Foundation of China (62071475, 61890542, 62001481)

责任主编: 丁泽刚 Corresponding Editor: DING Zegang

phase modulation model is established, and its spectrum has continuous frequency shift characteristics. On this basis, the influence of continuous frequency shift modulation induced by nonperiodic PSS on SAR was further discussed and the defocusing phenomenon of the target along the range direction was detected. Through the simulation of measured data, the validity of the proposed theoretical method is verified.

Key words: Time-varying electromagnetic materials; Phase-Switched Screen (PSS); Nonperiodic modulation; Spectrum conversion; Synthetic Aperture Radar (SAR)

1 引言

目标微动是自然界普遍存在的物理现象, 其主要由目标或目标本体除质心以外的转动、振动等微小运动产生。因其在不同方向上的运动分量, 往往能够对电磁波产生多普勒的调制作用, 使得回波频谱产生展宽效应^[1,2]。对于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)而言, 微动目标能够在脉间回波信号上进行非平稳的相位调制, 使目标图像形成失配和散焦效应, 这种现象在目标识别与反识别领域被广泛关注与研究。文献^[3,4]研究了由目标微动产生不同方向上的运动分量对SAR回波的多普勒调制作用, 并将其应用于干扰领域, 沿方位向形成了直线条带型亮带。然而, 由于微动调制速率较慢, 只能对SAR信号脉间进行一定程度的切割, 无法形成距离向的调制。

人工电磁材料是通过微小单元的空间组合与分布来实现特定电磁特性的功能性材料, 其通过特殊设计可形成自然界材料所没有的电磁特性^[5-7]。作为电磁材料的热点, 电磁波控制技术引起了人们的广泛研究, 其主要包含幅度调制^[8,9]、相位调制^[10,11]、频率调制^[12,13]、极化调制^[14,15]、波束指向^[16,17]等, 其相关技术在无线通信、雷达成像、电子对抗等广大领域具有重大的应用价值^[18]。这些调控技术往往需要外加激励进行实现, 目前主要的控制方式包括机械调控、电控调节、光照温控调节等^[19,20]。其中电控时变电磁材料利用外加电压激励实现自身散射特性的时变, 由于其设计灵活、集成度高等优点, 是近年来可重构电磁材料主要的实现方式。

相对于由目标机械运动形成的微动调制, 电控可调材料的切换速率更快, 一般可达几十纳秒数量级, 实现对SAR回波信号的脉内调控, 形成不同的雷达效应。国防科技大学冯德军等人率先开展了此方面工作的探索, 文献^[21]研究了线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)经相位调制表面(Phase-Switched Screen, PSS)周期调制后的匹配滤波特性, 证明了PSS具有多虚假峰生成能力。在此基础上, 文献^[22]提出了基于PSS的高分辨距离像的多假目标生成方法, 能够在原始目标附近生成多个逼真的高分辨距离像。文献^[23]研究了有源

频率选择表面(Active Frequency Selective Surface, AFSS)的成像特性, 并通过外场成像实验揭露了基于周期AFSS的距离向偏移现象。然而, 上述研究主要基于周期调制, 其他调制波形鲜有关注。同时, 不论是PSS相位调制还是AFSS幅度调制, 本质都是基于时变调制模型, 目前报道并没有建立一个关于SAR的时变材料电磁调控模型, 揭露其本质物理原理, 为后续其他电磁材料的研究提供理论依据。

基于此, 本文从电控时变电磁材料的脉内调制为出发点, 研究了电控时变电磁材料的SAR成像特性。第2节对时变电磁材料的电磁调控原理进行了研究, 分别分析了时变电磁材料谱变换模型以及成像雷达目标特征控制原理。第3节以PSS为例, 对非周期PSS相位调制模型进行了具体分析, 信号频谱具有连续的频移特性。第4节进一步探讨了由非周期PSS形成的连续频移调制对SAR成像特性的影响。相较于微动调制, 由于PSS能够切割单个雷达信号脉冲, 调制回波经距离多普勒(Range Doppler, RD)成像算法处理后^[24], 非周期PSS的成像输出在距离向形成散焦现象。第5节利用SAR实测数据点目标仿真验证了所提方法的有效性。第6节对本文主要内容进行了总结。

2 时变电磁材料的电磁调控原理

如图1所示, 电控时变电磁材料是由电控可调材料以及与之匹配的控制系统组成, 电控可调材料一般采用二维阵列结构, 二极管作为可控元素, 其通过偏置电路的电压实现阻抗性能的改变并获得对于电磁波的调控。与超表面RCS缩减^[25]和Salisbury屏相位干涉^[26]不同, 本文利用了电磁材料散射特性的动态时变特征, 这种切换通过一种时间函数执行, 因此其散射特性表现为时间的函数。通过电控的方式, 获得反射回波的幅度、相位、时频特性等性质的灵活调控, 实现对于目标雷达特征的控制。

本节对时变电磁材料的电磁调控原理进行了研究, 分为时变材料谱变换模型与SAR目标特征控制原理。其中材料选择可包含幅度调制型材料与相位调制型材料, 调制波形包括周期矩形脉冲与非周期矩形脉冲。

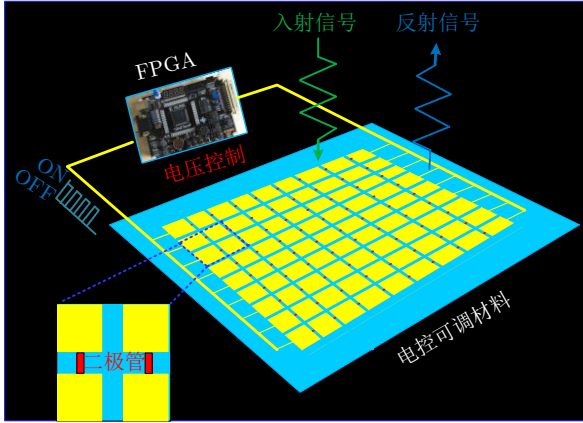


图1 电控时变电磁材料

Fig. 1 Electronically controlled time-varying electromagnetic materials

2.1 时变电磁材料的谱变换模型

谱变换现象常常存在于电磁波与物质相互作用之下，导致辐射场以新频率振荡，从微波到光学频率都可以被广泛观察到^[27]。到目前为止，谱变换已经在源生成、无线通信、光学计算等领域得到了广泛的应用。

在信息论中，已知时变矩形脉冲信号能够产生离散或连续的频谱，包括单极性和双极性信号。这里的单极性信号，即“1 0”编码信号可以等价于幅度调制信号，而双极性信号，即“+1 -1”编码信号等价于相位调制信号。受此启发，时变电磁材料被应用于实现回波的谱变换。

假设时变电磁材料的反射系数表示为 $w(t)$ ，无论是幅度调制还是相位调制，其调制矩形脉冲信号频谱均可表示为

$$W(f) = A \cdot \delta(f - \Delta w) \quad (1)$$

其中， A 表示频谱的幅度系数， Δw 表示频移调制。以点目标条件进行分析，假设入射信号为 $\varphi_{\text{inc}}(t)$ ，经时变电磁材料调制后的反射信号频谱表示为

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ref}}(f) &= W(f) \otimes \varphi_{\text{inc}}(f) \\ &= A \cdot \varphi_{\text{inc}}(f - \Delta w) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\varphi_{\text{inc}}(f)$ 为信号 $\varphi_{\text{inc}}(t)$ 的频谱。式(2)表明，反射波的频谱相当于时变电磁材料对入射波施加了频移调制，并加权了 A 的幅度系数。

2.2 SAR目标特征控制原理

SAR生成的电磁辐射信号，经目标以及地物背景散射形成相应的雷达回波信号，这些信号在接收处理机根据相关成像算法在雷达屏幕上形成目标与地物图像，识别系统利用相应目标模板获取具有物理意义的目标特征。由上述分析可知，时变电磁材料能够实现反射回波的谱变换，这些回波经雷达成像处理将引起雷达图像上目标特征的变化。

如图2所示，SAR利用发射宽带脉冲信号实现距离向高分辨能力(快时间域)，同时通过雷达平台与目标之间的相对运动，依靠脉间的积累获取方位向高分辨能力(慢时间域)，以此形成二维高分辨图像。LFM信号因具有较大的时宽带宽积，常被选作SAR发射信号，其可以表示为

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, t_m) &= \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_P}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}K_r t^2\right)\right], \\ \hat{t} &\in [-T_P/2, T_P/2] \end{aligned} \quad (3)$$

其中，快时间变量 \hat{t} 代表接收信号的时延，对应SAR图像的距离向。慢时间 t_m 代表脉冲发射时刻，对应SAR图像的方位向。 $t = \hat{t} + kT$ 代表全时间， T 代表脉冲重复周期， k 为正整数。 T_P 代表信号脉宽， f_0 代表信号载频， K_r 表示LFM信号调频率。

当电磁材料散射特性时变时，其调制速度可达几十纳秒，而SAR信号脉宽一般为微秒级。因此电控时变电磁材料能够实现对回波的脉内调控，相当于对反射信号施加了频移调制，引起了成像输入信号相位的改变，经接收机混频和滤波处理后，生成的基带信号可以表示为

$$\begin{aligned} r(\hat{t}, t_m) &= A_\sigma \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_P}\right) \text{rect}\left(\frac{t_m}{T_L}\right) \\ &\cdot \exp\left[\frac{-4\pi j R_0(t_m)}{\lambda}\right] \\ &\cdot \exp\left[-j\pi K_r \left(\hat{t} - \frac{2R_0(t_m)}{c}\right)^2 - \Delta\varphi\right] \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)仅从脉内快时间调控进行分析，不考虑电控时变电磁材料的脉间慢时间调制特性。其中 A_σ 为点散射强度， T_L 表示合成孔径时间， c 代表电磁波在空间中的传播速度， λ 为信号波长。式(4)中第1个 $\exp(\cdot)$ 函数表示方位向慢时间项，为方位向脉压的基础。第2个 $\exp(\cdot)$ 函数表示距离向快时间项，

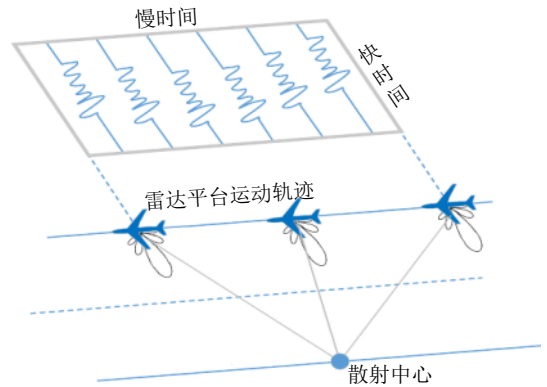


图2 SAR成像模型

Fig. 2 SAR imaging model

为距离向脉压的基础, $\Delta\varphi$ 为距离调制项相位的变化, 其与电磁材料的时变调制相关^[22]。

RD成像算法被广泛应用于SAR系统, 其核心思想主要是基于二维匹配滤波算法。当信号进行脉压处理后, 得到的二维输出表示为

$$I(R_r, R_a) = A_{\text{coef}} \text{sinc} \left[\frac{K_a T_L R_a}{v} \right] \cdot \text{sinc} \left[\frac{2K_r T_P}{c} (R_r - \Delta R) \right] \quad (5)$$

其中, R_r 表示距离向位置变量, R_a 表示方位向位置变量, v 表示雷达载机平台的速度。 ΔR 代表电磁材料时变调制引起的距离向位置偏移量。根据式(5), 图像输出的sinc峰在距离向发生了距离偏移, 引起了目标图像的变化。

3 非周期PSS相位调制与谱变换模型

第2节对时变电磁材料的电磁调控原理进行了阐述, 由于周期调制在许多报道中已经做了细致的研究^[22,23], 本节以PSS材料为代表, 介绍非周期PSS相位调制与谱变换模型, 第4节将对非周期PSS的成像特性进行进一步的分析。

作为一种新型结构型吸波材料, PSS主要包括开关型阻抗层、介质层以及金属导体背板^[28,29]。开关阻抗层一般由AFSS有源阻抗层构成, 每个单元元素之间通过可变阻抗元件连接。其通过开关阻抗层在全反射和全透射之间进行间歇性地切换, 可以对入射电磁波施加一个双极性矩形脉冲时间序列的相位调制, 其信号幅值在+1和-1之间间歇切换。为了避免目标被雷达检测, 两种状态进行周期性地切换, 通常设定PSS周期调制频率大于接收机带宽, 使反射信号在频域产生离散频谱搬移的效果, 电磁波能量被可控地重新分配到位于雷达接收机之外的边带中, 基带的能量为零, 以实现被保护目标的低可探测性^[10]。

不同于传统的PSS调制技术, 本文使PSS调制频率小于接收机带宽, 其边带落于接收机带宽之内。本文借鉴了信息论与信号处理中非周期调制的思想^[30-32], 采用伪随机产生相应的码元, 使PSS进行非周期调制, 并对相应特性进行具体分析。假设这段脉冲序列受随机编码序列 $a_k \in \{1, -1\}$ 所控制, 码宽为 τ , 码数为 K , “+1”码的数目为 K_1 , 占空比为 $\beta = K_1/K$ 。非周期PSS调制矩形脉冲串如图3所示。

调制信号 $p(t)$ 的时域响应为

$$p(t) = \text{rect} \left(\frac{t}{\tau} \right) \otimes \sum_{k=0}^{K-1} a_k \delta(t - k\tau) \quad (6)$$

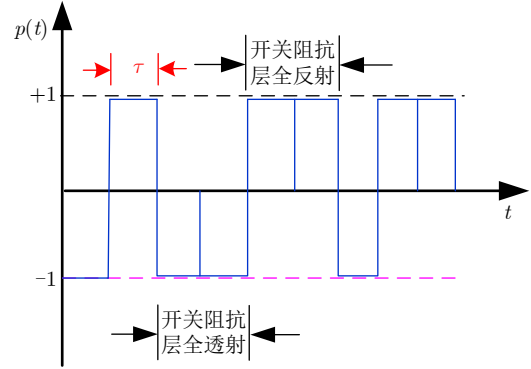


图3 非周期PSS相位调制波形

Fig. 3 Nonperiodic PSS phase modulation waveform

由傅里叶变换对应关系可知, $\text{rect}(t/\tau) \leftrightarrow \tau \text{sinc}(f\tau)$, $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$, 依据时域卷积定理, 信号频谱可以进一步表示为

$$P(f) = \tau \cdot \text{sinc}(f\tau) \sum_{k=0}^{K-1} a_k \exp(-j2\pi k\tau f) \quad (7)$$

当 $f=0$, 其零阶峰输出幅度系数为

$$P(0) = K\tau |1 - 2\beta| \quad (8)$$

当 $f = \pm 1/\tau$, $P(f) = 0$, 此时调制信号频谱的主瓣宽度为

$$B_{\text{main}} = \frac{2}{\tau} \quad (9)$$

利用非周期PSS对入射信号 $s(t)$ 进行调制, 已调制信号频谱表示

$$R(f) = S(f) \otimes P(f) = \underbrace{K\tau |1 - 2\beta| S(f)}_{\text{第1项}} + \underbrace{\tau \cdot \text{sinc}(f\tau) \sum_{k=0}^{K-1} a_k \exp(-j2\pi k\tau f)}_{\text{第2项}} \Big|_{f \neq 0} \otimes S(f) \quad (10)$$

根据式(10), 经非周期PSS相位调制后的信号频谱包含两个部分: 式(10)第1项代表零阶峰, 其频谱形式与入射信号频谱一致, 当 $\beta=0.5$ 时, 零阶峰输出值为零。由于 a_k 的随机性, 式(10)第2项不能被进一步解析, 根据信号 $p(t)$ 傅里叶变换以及统计意义上的功率谱可知^[31], 非周期调制是一种间距无限小的离散调制, 式(10)第2项可以视为对入射信号进行连续的频谱搬移, 非周期调制后的信号频谱由于其连续频移特性而出现混叠。

假设非周期PSS调制信号码元宽度 $\tau=0.02 \mu\text{s}$ 和 $\beta=0.5$, 图4(a)给出了相应调制波形的频谱。不同

于周期调制的离散谱, 非周期PSS调制是一种连续频移调制, 频谱中心处 $P(0)=0$, 主瓣宽度为100 MHz。改变码元宽度 $\tau=0.01 \mu\text{s}$, 主瓣宽度变为200 MHz, 频谱中心零点不变, 如图4(b)所示。图4(c)给出了码宽 $\tau=0.02 \mu\text{s}$ 和 $\beta=0.3$ 非周期PSS信号频谱, 零频点处出现尖峰, 同时信号连续谱幅度相应降低。因此, 占空比主要影响频谱的幅度系数, 码宽主要影响频谱的位置关系, 随着码宽的减小, 其主瓣范围逐渐增大。

4 非周期PSS的成像分析

经PSS非周期调制的LFM反射信号经过接收机混频和滤波处理后, 生成的基带信号表示为

$$r(\hat{t}, t_m) = A_\sigma \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_P}\right) \text{rect}\left(\frac{t_m}{T_L}\right) \cdot \exp\left[\frac{-4\pi j R_0(t_m)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[-j\pi K_r \left(\hat{t} - \frac{2R_0(t_m)}{c}\right)^2\right] \cdot \left[\text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{\tau}\right) \otimes \sum_{k=0}^{K-1} a_k \delta(\hat{t} - k\tau)\right] \quad (11)$$

式(11)中的调制项部分不能像周期调制^[22,23]一样通过傅里叶级数展开, 根据统计意义上的功率谱可知, 其本质同样是影响了第2个快时间项 $\exp(\cdot)$ 函数的相位项变化。

RD成像算法被用于本文以生成高分辨率SAR图像。RD处理可以分为两个相对独立的步骤: 脉冲压缩和方位压缩。在脉冲压缩中, 匹配滤波处理是一种常用的方法, 匹配滤波函数一般可表示为 $s_r(\hat{t}) = \text{rect}(\hat{t}/T_P) \cdot \exp(-j\pi K_r \hat{t}^2)$, 其频率响应表示

$$I(\hat{t}, t_m) = \underbrace{\tau K |1 - 2\beta| I_r(\hat{t}) I_a(t_m)}_{\text{第1项}} + \underbrace{\left[\tau \sum_{k=0}^{K-1} a_k F^{-1} \left(\text{sinc}(f\tau) \exp(-j2\pi n\tau f) \right) \Big|_{f \neq 0} \otimes S_{\hat{t}}(f) S_r^*(f) \right]}_{\text{第2项}} I_a(t_m) \quad (16)$$

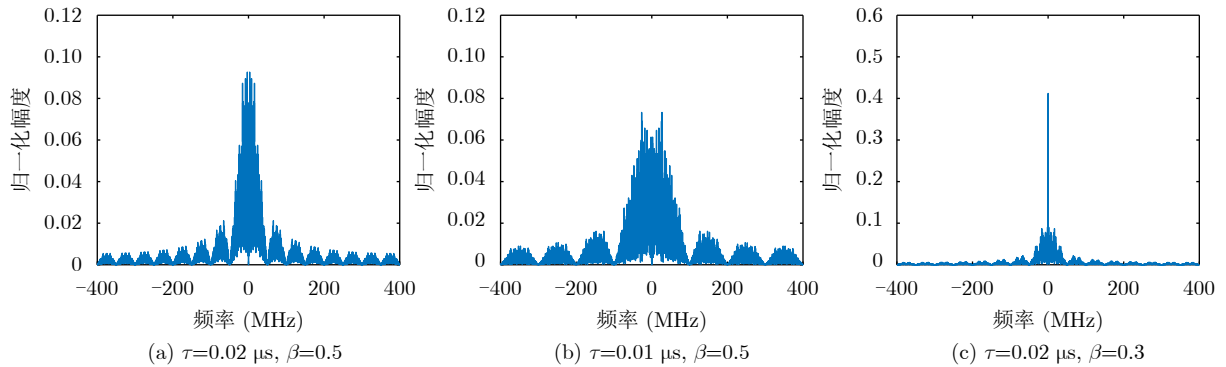


图4 非周期PSS波形频谱特性

Fig. 4 Spectrum characteristics of nonperiodic PSS waveform

为 $H(f)=S_r^*(f)$ 。脉压过程只对回波快时间部分进行处理, 即 $R_{\hat{t}}(f)$ 与 $S_{\hat{t}}(f)$ 。通过滤波器的调制回波频率响应为

$$Y_{\hat{t}}(f) = R_{\hat{t}}(f) S_r^*(f) = \tau K |1 - 2\beta| S_{\hat{t}}(f) S_r^*(f) + \tau \cdot \text{sinc}(f\tau) \sum_{k=0}^{K-1} a_k \exp(-j2\pi k\tau f) \Big|_{f \neq 0} \otimes S_{\hat{t}}(f) S_r^*(f) \quad (12)$$

经PSS调非周期制后的基带信号通过距离脉压后得到其时域输出

$$y(\hat{t}, t_m) = \left[\begin{array}{l} \tau K |1 - 2\beta| I_r(\hat{t}) \\ + \tau \sum_{k=0}^{K-1} a_k F^{-1}(\text{sinc}(f\tau) \exp(-j2\pi n\tau f)) \Big|_{f \neq 0} \\ \otimes S_{\hat{t}}(f) S_r^*(f) \end{array} \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{t_m}{T_L}\right) \exp\left[\frac{-4\pi j R_0(t_m)}{\lambda}\right] \quad (13)$$

其中, $I_r(\hat{t}) = (1 - |\hat{t}/T_P|) \cdot \text{sinc}(K_r T_P \hat{t} (1 - |\hat{t}/T_P|))$ 为未调制点目标快时间距离压缩的结果。

根据式(13), 非周期PSS调制的脉压输出结果包含一个零阶峰, 其幅度系数同样为 $\tau K |1 - 2\beta|$ 。式中第2项不能被进一步用解析形式进行表征, 其表示为连续的频移调制在匹配滤波的线性叠加, 将引起距离项位置的连续偏移, 其主瓣宽度可表示为

$$\Delta t = \frac{2}{\tau K_r} \quad (14)$$

同时生成连续块状区域中心点位置可表示为

$$t_{\text{cen}} = \frac{2n + 1}{2\tau K_r}, \quad (n \neq 0) \quad (15)$$

对式(13)慢时间域进行方位压缩, 经PSS调制的二维图像输出可表示为

其中, $I_a(t_m) = (1 - |t_m/T_L|) \cdot \text{sinc}(K_a T_L t_m (1 - |t_m/T_L|))$ 为未调制点目标慢时间方位压缩结果。 K_a 为方位调制频率。

根据式(16)的第1项, 图像输出包含一个零阶点目标, 当 $\beta=0.5$ 时, 零阶点目标消失。第2项表示距离压缩时连续频移调制的线性叠加, 图像中, 条带状区域沿距离向展开。

在仿真中, 假设LFM信号的中心频率10 GHz, 脉宽10 μs , 带宽50 MHz, 调频率 $K_r = B/T_P = 5 \times 10^{12}$ Hz/s。图5给出了在不同码元宽度、占空比下非周期PSS相位调制的匹配滤波输出结果。当非周期PSS调制信号 $\tau=0.02$ μs , $\beta=0.5$, 如图5(a)所示, 非周期PSS调制后的输出是一个连续的频移调制过程, 相对于原始峰值输出, 幅度遭受了部分的损失, 零阶峰消失, 频谱主瓣宽度为2 μs , 生成连续块状区域中心点位置为 $[\pm 1.5$ μs , ± 2.5 μs , ± 3.5 μs , ...], 与式(15)分析一致。

在图5(b)中, 码元宽度变 $\tau=0.01$ μs , 其相应主瓣宽度变为4 μs , 随着PSS码宽的减小, 其主瓣范围日益增加。改变占空比 $\beta=0.3$, 如图5(c)所示, 匹配滤波输出零点形成尖峰, 这与理论分析相符。

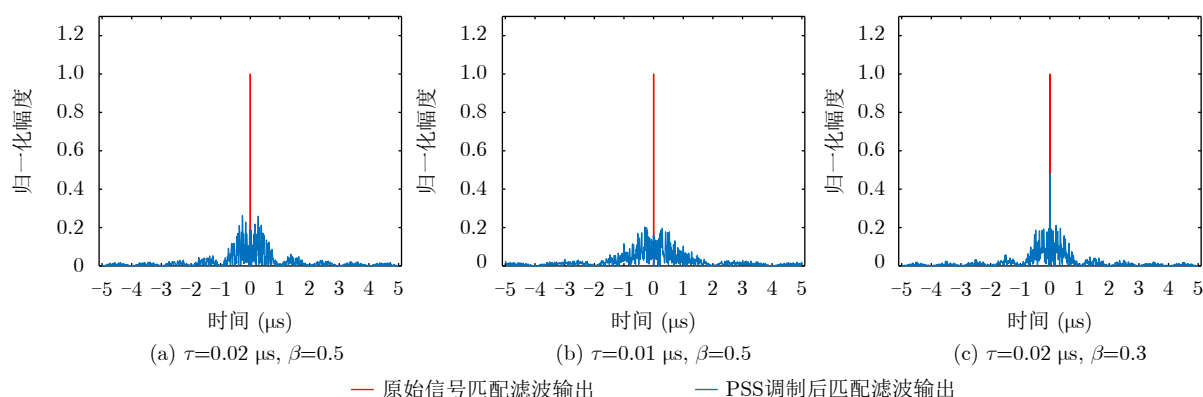


图 5 非周期PSS调制的匹配滤波输出

Fig. 5 Nonperiodic PSS modulated matched filter output

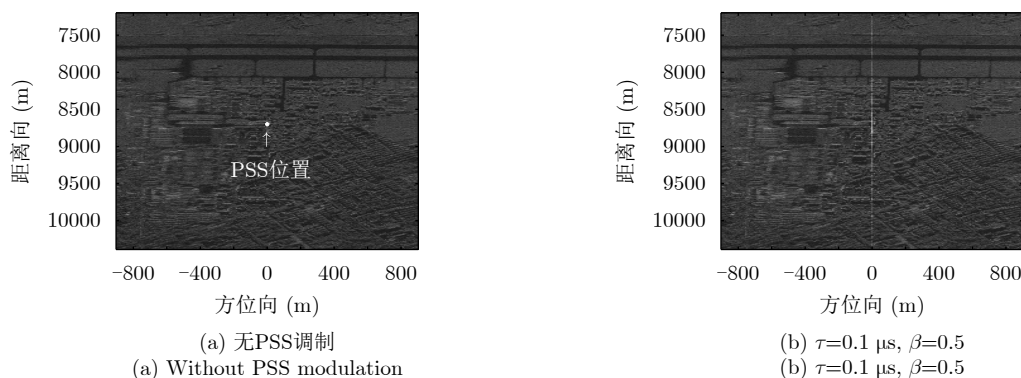


图 6 基于非周期PSS调制的SAR成像效果图

Fig. 6 SAR imaging effect based on aperiodic PSS modulation

5 实测数据点目标仿真

通过理论分析已知, 非周期PSS的成像输出形成散焦效应, 能够沿距离向生成条带状区域。接下来, 将利用SAR实测数据点目标仿真来验证所提调制方法的有效性。

SAR平台参数与雷达信号参数如下, 平台运动速度为117.5 m/s, 信号载频9.6 GHz, 信号带宽70.3 MHz, 脉冲宽度20 μs , 脉冲重复周期1 ms, 场景成像采用RD成像算法, 真实场景SAR图像如图6(a)所示, 其包含城市建筑、乡村道路与机场跑道。将时变PSS材料置于场景中央(8700 m, 0 m)处, 未对其进行任何调制处理, 图像中央白色圆点代表PSS所在位置, 此步骤中可将PSS视为点目标模型。

下面仿真基于非周期PSS相位调控的成像效果, 此过程仅对脉内进行非周期调制, 而脉间的编码序列相同。设定PSS调制码元宽度为0.1 μs , 调制占空比为0.5。点目标PSS非周期调制成像效果如图6(b)所示, 原始PSS点目标发生散焦现象, 一条沿距离向的直线条带型亮带在方位单元0 m处形成, PSS中心处亮度较强, 能量较高, 距离PSS所

在位置越远的条带状区域能量越弱, 这与理论分析以及图5的仿真结果是一致的。

6 结论

本文对电控时变电磁材料的成像特性进行了研究。通过对时变电磁材料谱变换特性的分析和SAR目标特征控制方法的研究揭示了目标成像特征距离向偏移的内在机理。以PSS电磁材料为代表, 建立了非周期PSS相位调制模型, 其频谱具有连续频移特性。通过对码宽与占空比的改变, 可以实现频谱包络主瓣宽度与幅度特性的灵活控制。在此基础上, 进一步研究了非周期时变PSS的成像特性, 详细描述了目标的散焦特性。散焦现象会削弱对目标的准确识别, 可用于反识别领域。SAR实测数据点目标仿真证明了所提出方法的有效性。

本文从信号层面验证了非周期PSS的脉内调控能够对SAR图像形成距离向散焦特征。然而, 关于时变材料电磁特性、具体应用方式的探讨未在文中开展, 例如频带宽度、极化范围、角域大小等。因此时变电磁材料的雷达特征在理论、特性、应用等方面还有很多奥秘值得进一步探索。

参考文献

- [1] CHEN V C, LI F, HO S S, *et al.* Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2–21. doi: [10.1109/TAES.2006.1603402](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603402).
- [2] 庄钊文, 刘永祥, 黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. *电子学报*, 2007, 35(3): 520–525. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.028](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.028).
ZHUANG Zhaowen, LIU Yongxiang, and LI Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 520–525. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.028](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.028).
- [3] 吴晓芳, 刘阳, 王雪松, 等. 旋转微动目标的SAR成像特性分析[J]. *宇航学报*, 2010, 31(4): 1181–1189. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2010.04.039](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2010.04.039).
WU Xiaofang, LIU Yang, WANG Xuesong, *et al.* Analysis of SAR imaging characteristics of targets with rotational micro-motion[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1181–1189. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2010.04.039](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2010.04.039).
- [4] 白雪茹, 孙光才, 周峰, 等. 基于旋转角反射器的ISAR干扰新方法[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(5): 867–872. doi: [10.13443/j.cjors.2008.05.019](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2008.05.019).
BAI Xueru, SUN Guangcai, ZHOU Feng, *et al.* A novel ISAR jamming method based on rotating angular reflectors[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(5): 867–872. doi: [10.13443/j.cjors.2008.05.019](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2008.05.019).
- [5] PENDRY J B. Focus issue: Negative refraction and metamaterials[J]. *Optics Express*, 2003, 11(7): 639. doi: [10.1364/OE.11.000639](https://doi.org/10.1364/OE.11.000639).
- [6] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, *et al.* Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1494–1496. doi: [10.1126/science.1094025](https://doi.org/10.1126/science.1094025).
- [7] PADILLA W J. Group theoretical description of artificial electromagnetic metamaterials[J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1639–1646. doi: [10.1364/OE.15.001639](https://doi.org/10.1364/OE.15.001639).
- [8] TENNANT A and CHAMBERS B. Adaptive radar absorbing structure with PIN diode controlled active frequency selective surface[J]. *Smart materials and Structures*, 2004, 13(1): 122–125. doi: [10.1088/0964-1726/13/1/013](https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/1/013).
- [9] HUANG Cheng, ZHAO Bo, SONG Jiakun, *et al.* Active transmission/absorption frequency selective surface with dynamical modulation of amplitude[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(6): 3593–3598. doi: [10.1109/TAP.2020.3037813](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3037813).
- [10] CHAMBERS B and TENNANT A. The phase-switched screen[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2004, 46(6): 23–27. doi: [10.1109/MAP.2004.1396733](https://doi.org/10.1109/MAP.2004.1396733).
- [11] RAMACCIA D, SOUNAS D L, ALÙ A, *et al.* Phase-induced frequency conversion and Doppler effect with time-modulated metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1607–1617. doi: [10.1109/TAP.2019.2952469](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2952469).
- [12] SAIKIA M, SRIVASTAVA K V, and RAMAKRISHNA A S. Frequency-shifted reflection of electromagnetic waves using a time-modulated active tunable frequency-selective surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 2937–2944. doi: [10.1109/TAP.2019.2951494](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2951494).
- [13] 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).
- [14] JIA Yongtao, LIU Ying, GUO Y J, *et al.* A dual-patch polarization rotation reflective surface and its application to ultra-wideband RCS reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3291–3295. doi: [10.1109/TAP.2017.2694879](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2694879).
- [15] ZAKER R and SADEGHZADEH A. A low-profile design of polarization rotation reflective surface for wideband RCS reduction[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(9): 1794–1798. doi: [10.1109/LAWP.2019.2930130](https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2930130).
- [16] 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/lssa.2014.99](https://doi.org/10.1038/lssa.2014.99).
- [17] 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).
- [18] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 可重构电磁超表面及其应用研究进展[J]. *雷达学报*, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Recent advances in reconfigurable metasurfaces and their applications[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
- [19] LUO Yong, KIKUTA K, HAN Zhengli, *et al.* An active metamaterial antenna with mems-modulated scanning radiation beams[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2016, 37(7): 920–923. doi: [10.1109/LED.2016.2565559](https://doi.org/10.1109/LED.2016.2565559).
- [20] BRYANT A T, LU Liqing, SANTI E, *et al.* Physical modeling of fast p-i-n diodes with carrier lifetime zoning, Part I: Device model[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(1): 189–197. doi: [10.1109/TPEL.2007.911823](https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.911823).
- [21] XU Letao, FENG Dejun, and WANG Xuesong. Matched-filter properties of linear-frequency-modulation radar signal reflected from a phase-switched screen[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(2): 318–324. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0182](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0182).
- [22] XU Letao, FENG Dejun, and WANG Xuesong. High-resolution range profile deception method based on phase-switched screen[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1665–1668. doi: [10.1109/LAWP.2016.2521778](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2521778).
- [23] 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).
- [24] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 123–134.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 123–134.
- [25] YASIR S, 杨国敏, 徐丰. 四叶草形超宽带漫散射编码超表面[J]. *雷达学报*, 2021, 10(3): 382–390. doi: [10.12000/JR21061](https://doi.org/10.12000/JR21061).
YASIR S, YANG Guomin, and XU Feng. A four-leaf clover-shaped coding metasurface for ultra-wideband diffusion-like scattering[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 382–390. doi: [10.12000/JR21061](https://doi.org/10.12000/JR21061).
- [26] 张然, 冯德军, 徐乐涛. 基于Salisbury屏的二面角设计及其极化特性分析[J]. *雷达学报*, 2016, 5(6): 658–665. doi: [10.12000/JR16055](https://doi.org/10.12000/JR16055).
ZHANG Ran, FENG Dejun, and XU Letao. Design and polarization characteristics analysis of dihedral based on Salisbury screen[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(6): 658–665. doi: [10.12000/JR16055](https://doi.org/10.12000/JR16055).
- [27] WEI Yue, SHEN Gangxiang, and BOSE S K. Span-restorable elastic optical networks under different spectrum conversion capabilities[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2014, 63(2): 401–411. doi: [10.1109/TR.2014.2313806](https://doi.org/10.1109/TR.2014.2313806).
- [28] TENNANT A. Reflection properties of a phase modulating planar screen[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(21): 1768–1769. doi: [10.1049/el:19971160](https://doi.org/10.1049/el:19971160).
- [29] CHAMBERS B and TENNANT A. Reflection of radar signals from multiple phase-modulated surfaces[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(2): 142–148. doi: [10.1049/iet-rsn:20060078](https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20060078).
- [30] SHULMAN N and FEDER M. Random coding techniques for nonrandom codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45(6): 2101–2104. doi: [10.1109/18.782147](https://doi.org/10.1109/18.782147).
- [31] TAI Ning, CUI Kaibo, WANG Chao, *et al.* The design of a novel coherent noise jammer against LFM radar[J]. *IEICE Electronics Express*, 2016, 13(21): 1–12. doi: [10.1587/ele.13.20160924](https://doi.org/10.1587/ele.13.20160924).
- [32] WU Qihua, LIU Xiaobin, LIU Jin, *et al.* A radar imaging method using nonperiodic interrupted sampling linear frequency modulation signal[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(20): 8294–8302. doi: [10.1109/JSEN.2018.2865531](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2865531).

作者简介



王俊杰(1991–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新材料电磁调控、雷达信号处理与新型电子对抗。



冯德军(1972–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为智能电子对抗、精确制导与目标识别。



王志淞(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为武器装备实验鉴定。



李永祯(1977-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为极化雷达与电子对抗。



邢世其(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为极化雷达成像、雷达信号处理与合成孔径雷达对抗。



王雪松(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为极化雷达、目标识别与电子对抗。