

文章编号: 2095-4980(2022)02-0140-07

自卫干扰位置可控式 ISAR 假目标合成方法

潘小义¹, 艾 夏², 刘佳琪², 陈吉源¹, 肖顺平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, 湖南 长沙 410073; 2.试验物理与计算数学国家重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 为提高逆合成孔径雷达(ISAR)图像欺骗干扰的逼真度, 基于点散射调制模板构建了自卫式干扰(SSJ)条件下位置可控二维假目标干扰信号模型, 研究了调制坐标、坐标偏移量以及转速对二维假目标图像合成的影响。理论分析表明, 在雷达截获信号的快时间域增加与纵向调制坐标及偏移量对应的时延可以控制假目标的纵向位置; 而在慢时间域增加与横向调制坐标及偏移量对应的相位变化因子可控制假目标的横向相对位置; 调制转速则使得假目标图像发生横向扩展或压缩。仿真实验结果验证了理论分析的正确性, 表明本文位置可控式 ISAR 假目标干扰信号合成方法有效, 且干扰功率要求较低。

关键词: 逆合成孔径雷达; 自卫干扰; 假目标图像; 欺骗干扰

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021327

Synthesis of ISAR decoys with controllable position in Self-Screening Jamming

PAN Xiaoyi¹, AI Xia², LIU Jiaqi², CHEN Jiyuan¹, XIAO Shunping¹

(1.State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China; 2.National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematics, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to improve the reality of false-target image in deception jamming against Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR), the signal modeling of two-dimensional decoys in Self-Screening Jamming(SSJ) scenarios with controllable position is studied based on the modulation template in scattering center model. Firstly, the time delay in the fast time domain corresponding to the longitudinal modulated coordinates and offsets can control the position of the false target in the down range. Secondly, the phase modulating coefficient in the slow time domain corresponding to the transverse modulated coordinates and offsets can control the position in the cross range. Thirdly, the modulated speed would cause horizontal extension or compression of the false-target image. The simulation results verify the correctness of the theoretical analysis and demonstrate the effectiveness of the proposed jamming method, and it also has low power requirement.

Keywords: ISAR; Self-Screening Jamming; false-target image; deception jamming

逆合成孔径雷达(ISAR)是一种高分辨小旋转角成像技术, 在目标分类、辨识等领域应用广泛, 尤其在战场敌我识别、导弹精确制导等领域发展迅速^[1-3]。相应地, ISAR 干扰技术也逐渐成为雷达对抗领域的热点, 有效干扰 ISAR 系统, 已成为提高重要军事目标生存性的紧迫需求之一^[4-6]。

数字射频存储(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)具有大带宽、高保真等优良特性, 使干扰信号可获得较高的相干处理增益^[7-9]。而如何利用 DRFM 转发产生二维假目标(或称为假目标图像)则是 ISAR 有源干扰的难题之一。究其原因, 一方面, 直接转发干扰信号本身不携带任何目标散射信息, 难以形成目标二维微波图像, 常见解决方法一般是通过假目标模板调制或者利用目标散射波信号, 将散射信息融合到干扰信号中然后转发至雷

收稿日期: 2021-09-03; 修回日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61890540; 61890542)

达^[10-13]；另一方面，对于运动平台(如飞机、舰船等)自卫式干扰而言，被保护平台和雷达之间的相对位置处于不断变化之中，这种非合作的运动关系导致调制干扰信号模型较难建立。因此，已有的ISAR二维假目标图像欺骗干扰研究一般仅仅考虑转台模型下干扰信号的形成，而对于运动平台(包含有平动及转动)二维假目标图像欺骗干扰的相关研究尚未见诸报道。文献[10]提出利用数字图像合成(Digital Image Synthesis, DIS)技术实现ISAR虚假图像欺骗干扰，其本质是利用假目标模板，将DRFM截获到的雷达信号进行相位递增调制和幅度调制，模拟转动目标ISAR回波形成过程，转发信号在雷达处经相应处理形成虚假目标图像。文献[12]利用散射波信号特性，将拖曳式干扰机应用于ISAR干扰，文中虽然假设平台处于运动状态，但通过其推导过程可知结论是基于运动补偿有效的前提下得到的，且仅考虑了干扰信号成像结果，而非混合信号成像结果。实际上，根据ISAR成像处理流程，当平台处于运动状态时，混合信号到达ISAR处理端时，二维假目标图像欺骗干扰研究实际上包含三个问题：1) 如何依据假目标模板对采样信号进行调制？2) 混合信号经运动补偿后的效果如何？3) 经运动补偿后的混合信号成像效果如何？

本文在文献[14]研究成果的基础上，深化研究了运动平台自卫式ISAR二维假目标图像欺骗干扰信号形成机理，详尽分析了调制模板中调制坐标、坐标偏移量以及调制转速对假目标图像的影响，推导了横纵调制坐标、横纵调制坐标偏移量对应的快慢时间域具体调制方法。具体而言，首先将假目标模板调制过程视为干扰机处采样值信号相位和幅度调制过程，基于此，利用假目标散射点模型建立了运动平台下自卫式转发欺骗干扰信号调制模型；然后在运动补偿能够完成的假设下，推导了成像输出后二维假目标理论表达式，得到了调制坐标、调制坐标偏移量以及调制转速三个关键干扰参数及其对假目标图像欺骗干扰效果的影响；设计仿真实验，利用标准运动补偿过程对包含有运动平台回波和自卫式转发干扰信号的混合信号进行距离对齐和相位校准，结果显示混合信号经运动补偿后，能够校正距离和相位误差，这为二维假目标图像欺骗干扰形成提供了前提条件；最后通过改变实验参数，验证了上述三个干扰关键调制参数对二维假目标图像影响分析的正确性。

1 信号建模

首先建立相应的坐标系如图1中所示：雷达坐标系设为 UOV ， OV 轴为雷达照射方向；平台坐标系设为 xoy ，固连运动平台上，成像中心为坐标原点， x 轴沿平台平动方向；平台旋转运动参考坐标系设为 XoY ， XoY 与 UOV 平行且与平台坐标系共原点 o ，参考坐标系和平台坐标系初始夹角为 α_0 。

一般而言，平台本身存在平动和转动，设平动速度为 v_t ，沿雷达视线方向为正方向，其速度为 v_r ；顺时针转动方向为转动正方向，转动速度为 ω 。根据欧拉微分方程，平台坐标系 xoy 到参考坐标系 XoY 的初始变换矩阵以及旋转矩阵为^[14]：

$$\mathfrak{R}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 \\ \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{R}_{\text{rot}} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (1)$$

设干扰机位于运动平台上，考虑平台坐标系 xoy 上一散射点 (x_j, y_j) （同时也假设干扰机位于该点）， t 时刻在参考坐标系中坐标为 (X_t, Y_t) ，则有^[15]

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} = \mathfrak{R}_{\text{init}} \cdot \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \end{bmatrix} = \mathfrak{R}_{\text{rot}} \cdot \mathfrak{R}_{\text{init}} \cdot \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 (X_0, Y_0) 是 $t=0$ 时刻散射点 (x_j, y_j) 在参考坐标系中坐标值。则 $t=0$ 时刻该点距离雷达坐标中心 O 距离为：

$$R_{\text{los}} = \sqrt{R_0^2 + d_0^2 - 2R_0 d_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_0\right)} \quad (3)$$

式中： $d_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}$ 是散射点至平台坐标系原点 o 的距离； $\theta_0 = \arctan(Y_0/X_0)$ 为初始时刻散射点至 o 点连线与 X 轴正方向夹角。 t 时刻干扰机距离雷达坐标中心距离为：

$$R_{\text{los}} \approx R_{\text{los0}} + v_r t + X_0 \sin \omega t + Y_0 \cos \omega t \quad (4)$$

设雷达信号频率为 f ，根据“stop-go”模型，干扰机处接收信号相位为：

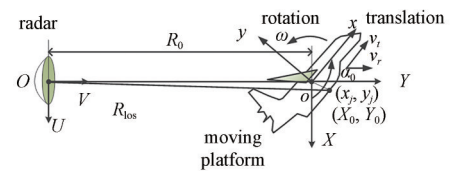


Fig.1 SSJ scenarios of moving platform
图1 运动平台自卫式干扰场景

$$\phi(t) = \frac{2\pi f}{c} (R_{\text{los0}} + v_r t + X_0 \sin \omega t + Y_0 \cos \omega t) \quad (5)$$

干扰机对来波信号进行采样, 然后调制假目标信息并将信号转发回雷达处。设假目标模板包含有 $i=1, 2, \dots, N$ 个散射点, 设第 i 个散射点调制相位为:

$$\phi_i = -\frac{4\pi f}{c} (\mu_i \omega t + v_i) \quad (6)$$

式中: μ_i 和 v_i 是假目标模板中该散射点的横纵坐标, c 为电磁波传播速度。忽略调制处理过程耗时, 则假目标散射点回波为:

$$E_{ji}(f, t) = \sigma_i \exp(2\phi(t) + \phi_i) \quad (7)$$

式中 σ_i 为调制幅度。

若经运动补偿后有 $(R_{\text{los0}} + v_r t) \leftarrow 0$, 则补偿后干扰信号为:

$$E_j(f, t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} (Y_0 + v_i + X_0 \omega t + \mu_i \omega t)\right) \quad (8)$$

对上式进行二维逆傅里叶变换可得^[16]

$$F_2^{-1}(E_j(f, t)) \approx \sum_{i=1}^N \frac{2B}{c} \frac{2f_0 \omega T_M}{c} \sigma_i \text{sinc}\left(\frac{2B}{c} (V - Y_0 - v_i)\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{2f_0 \omega T_M}{c} (U - X_0 - \mu_i)\right) \quad (9)$$

式中 f_0 是中心频率。至此, 获得了调制后干扰信号成像处理后二维假目标表达式。假目标中第 i 个散射点在雷达图像上将出现在

$$\begin{cases} U = X_0 + \mu_i \\ V = Y_0 + v_i \end{cases} \quad (10)$$

即假目标模板中各散射点出现的位置与调制假目标横纵坐标以及干扰机所处位置有关, 干扰机位置相对于运动平台固定时(自卫式干扰时一般可认为干扰机固定位于平台上), 可通过改变各散射点调制的横纵坐标偏移量(所有散射点横(纵)坐标加上或者减去一固定值)来控制假目标相对于平台的位置。此外, 上述推导中假设假目标调制转速和平台转速相等, 实际上, 由于平台和 ISAR 处于非合作关系, 平台成像时相对于 ISAR 的等效转速对于干扰实施方是未知的, 此时调制转速和平台转速将存在一定的差异, 这种差异将导致假目标发生变形。因此, 假目标的横纵坐标、坐标偏移量以及转速是调制的关键参数, 下面分别分析它们对二维假目标的影响。

2 干扰关键参数分析

2.1 调制坐标及偏移量对假目标图像的影响

根据式(10), 干扰机相对平台位置固定, 则二维假目标位置与调制的横纵坐标强相关。若调制模板横纵坐标以干扰机位置为参考中心(干扰机位置处散射点调制相位为零), 由于干扰机位于目标上, 则输出的假目标图像将会和平台图像相叠加。而若对所有散射点调制时加入一个固定的坐标偏移 $(\Delta\mu, \Delta v)$, 通过这个坐标偏移量, 可实现将假目标图像位置搬移至平台图像的四周, 实现假目标图像位置可控。即式(10)变为

$$\begin{cases} U = X_0 + \Delta\mu + \mu_i \\ V = Y_0 + \Delta v + v_i \end{cases} \quad (11)$$

具体而言, 当 $\Delta\mu > 0$ 时, 假目标图像相对于平台图像将向 U 轴正向移动, 反之则向 U 轴负向移动; 与此类似, 当 $\Delta v > 0$ 时, 假目标图像相对于平台图像将向 V 轴正向移动, 反之则向 V 轴负向移动, 假目标图像和平台图像的相对位置关系见示意图 2。

具体调制实现过程时, 对于假目标纵向坐标及偏移量的调制, 可通过在截获信号快时间域增加与纵向坐标及偏移量对应的时延 $2(\Delta v + v_i)/c$ 来实现; 而对于假目标横向坐标及偏移量的调制, 假设在较短的观测时

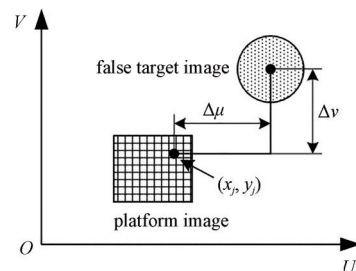


Fig.2 Sketch map of the false target and moving platform in the image plane
图2 假目标图像和平台图像相对位置示意图

间内，目标转动匀速，则可在截获信号慢时间域调制一个与横向坐标及偏移量对应的相位变化因子 $\exp\left(-j2\pi\frac{2f_0\omega t}{c}(\Delta\mu+\mu_i)\right)$ 来实现。

2.2 调制转速对假目标图像的影响

调制转速是影响二维假目标形状控制的重要因素，为保证假目标欺骗效果，应尽量使调制转速与平台相对雷达转速保持相近。但一般而言，由于雷达和干扰机是非合作关系，干扰机并不能获知平台相对于雷达的转速。可假设调制转速为 ω_1 ，与实际雷达成像时所等效的转速相差 $\Delta\omega=\omega_1-\omega$ ，则此时

$$E_j(f,t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c}(Y_0+v_i+X_0\omega t+\mu_i\omega_1 t)\right) \quad (12)$$

可知假目标模板上第 i 个散射点出现在

$$U = \frac{X_0\omega + \mu_i\omega_1}{\omega} = X_0 + \mu_i \frac{\omega_1}{\omega} \quad (13)$$

对于假目标模板上间距为 $\Delta\mu=\mu_{i+1}-\mu_i$ 的两点，在雷达成像后横向坐标间距变为：

$$\Delta x = \frac{\omega_1}{\omega}(\mu_{i+1}-\mu_i) = \frac{\omega_1}{\omega} \Delta\mu \quad (14)$$

即当 $\omega_1/\omega > 1$ 时，假目标图像横向发生扩展；反之则假目标图像横向发生压缩。

2.3 干扰功率估算

本文干扰方式本质上属于运动平台自卫式转发干扰，干扰信号功率相对于雷达回波功率具有单程优势。因此，可利用雷达方程估算干扰机所需功率。设雷达发射峰值功率为 P_t ，工作波长 λ ，收发天线增益 G_1 ，平台距离雷达距离 R_1 ，平均散射强度为 σ_1 ，则平台回波功率为：

$$P_{r1} = \frac{P_t G_1^2 \sigma_1 \lambda^2}{(4\pi)^3 R_1^4} \quad (15)$$

设干扰机功率为 P_j ，天线增益为 G_2 ，假目标模板平均散射强度为 σ_2 ， γ 为干扰信号和雷达信号的极化失配损失系数（通常干扰信号为圆极化，雷达天线为线极化， $\gamma=0.5$ ），则干扰信号在雷达处功率为

$$P_{r2} = \frac{P_j G_1 G_2 \sigma_2 \lambda^2 \gamma}{(4\pi)^2 R_1^2} \quad (16)$$

则干扰功率需满足

$$P_{r2} \geq P_{r1} \Rightarrow P_j \geq \frac{P_t G_1 \sigma_1}{4\pi G_2 \sigma_2 \gamma R_1^2} \quad (17)$$

其他参数不变的情况下，距离越远，对干扰机功率要求越低，干扰效果越有利。例如当 $P_t=500$ kW， $G_1=30$ dB， $R_1=10$ km， $\sigma_1=50$ m²（中型轰炸机）， $G_2=10$ dB， $\sigma_2=1$ m²，则干扰机功率需为 3 W。可见，本文方法对于干扰功率的要求是较低的。以下仿真中假设干扰功率满足式(17)的要求。

3 仿真实验

为验证上述理论分析，设计了三组仿真实验，分别用于验证调制坐标、调制坐标偏移量以及调制转速对二维假目标图像的影响。雷达参数设置如下：载波中心频率 10 GHz，工作带宽 1 GHz，脉冲重复频率 1 000 Hz，脉宽 100 μ s，方位向采样 512 次脉冲，距离单元数 1 024 个。平台散射点模型如图 3(a)所示（共 68 个散射点），平台运动速度 $v_r=200$ m/s，转速 $\omega=0.03 \times 2\pi$ rad/s；假目标散射点模型如图 3(b)所示（共 330 个散射点）。仿真中每次回波距离跟踪均存在一个随机误差。

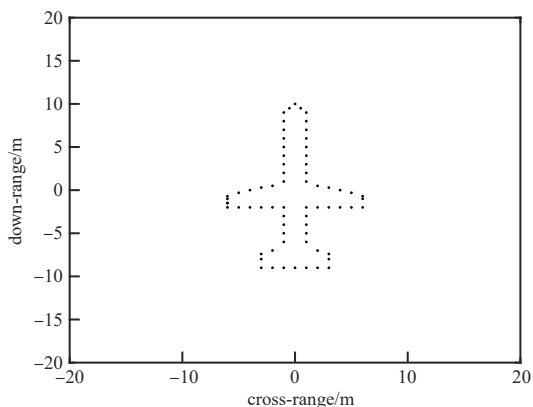


Fig.3(a) Point-scatterer model of moving platform

图 3(a) 运动平台散射点模型

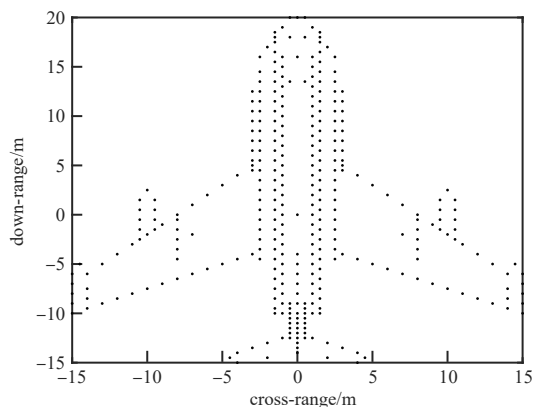


Fig.3(b) Point-scatterer model of false target

图 3(b) 假目标散射点模型

3.1 调制坐标及偏移量影响验证

利用两组仿真实验, 验证调制坐标及坐标偏移量对假目标图像的影响。仿真实验一设定干扰机位置 $X_0 = 0 \text{ m}$, $Y_0 = 0 \text{ m}$, 假目标坐标调制不存在偏移量, 假目标调制转速 ω_1 与平台转速 ω 相等。根据 2.1 节分析, 此时假目标调制的相位中心和平台成像中心重合, 假目标图像和平台图像应叠在一起。从仿真结果中不难验证以下结论: 由于各次回波距离跟踪存在随机误差, 混合回波在运动补偿前, 相邻回波在距离向上发生错位, 如图 4(a) 所示; 混合回波经运动补偿后, 各次回波的距离单元已基本对齐, 为假目标图像的形成提供了前提条件, 如图 4(b) 所示; 补偿后混合回波成像得到的假目标图像和平台图像相互叠加在一起, 如图 4(c) 所示。

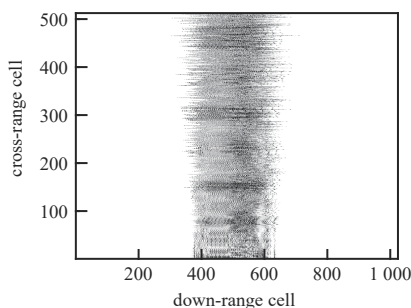


Fig.4(a) Mixed echo before motion compensation

图 4(a) 混合回波运动补偿前

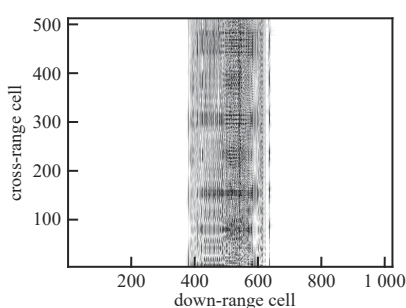


Fig.4(b) Mixed echo after motion compensation

图 4(b) 混合回波运动补偿后

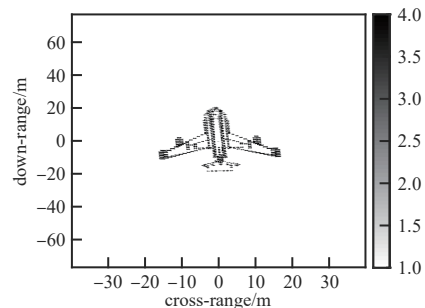


Fig.4(c) ISAR imaging of mixed echo

图 4(c) 混合回波成像结果

仿真实验二设定干扰机位置依然位于 $X_0 = 0 \text{ m}$, $Y_0 = 0 \text{ m}$ 处, 且调制转速与平台转速相等, 而调制坐标偏移量分别为 $\Delta\mu = 13 \text{ m}$, $\Delta\nu = 13 \text{ m}$ 和 $\Delta\mu = -20 \text{ m}$, $\Delta\nu = 20 \text{ m}$ 。从图 5(a) 和图 5(b) 中同样不难验证混合回波经运动补偿后, 回波在距离上基本对齐 (只绘出偏移量 $\Delta\mu = 13 \text{ m}$, $\Delta\nu = 13 \text{ m}$ 的情况, 偏移量 $\Delta\mu = -20 \text{ m}$, $\Delta\nu = 20 \text{ m}$ 时补偿结果类似)。补偿后混合回波成像得到的假目标图像以及调制偏移量相对于平台图像发生了相应的移动。具体而言, 当偏移量为 $\Delta\mu = 13 \text{ m}$, $\Delta\nu = 13 \text{ m}$ 时, $\Delta\mu > 0$, $\Delta\nu > 0$, 假目标图像移动方向为 U 轴和 V 轴正向, 如图 5(c) 所示; 而当偏移量为 $\Delta\mu = -20 \text{ m}$, $\Delta\nu = 20 \text{ m}$ 时, $\Delta\mu < 0$, $\Delta\nu > 0$, 假目标图像移动方向为 U 轴负向和 V 轴正向, 如图 5(d) 所示, 符合 2.1 节理论分析。

3.2 调制转速影响验证

利用两组不同调制转速, 验证二维假目标横向变形现象。设调制坐标偏移量为 $\Delta\mu = -13 \text{ m}$, $\Delta\nu = 13 \text{ m}$, 调制转速分别为 $0.04 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 和 $0.01 \times 2\pi \text{ rad/s}$, 即 $\Delta\omega = 0.01 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 和 $\Delta\omega = -0.02 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 。从图 6 中仿真得到的成像结果可见: 当 $\Delta\omega = 0.01 \times 2\pi \text{ rad/s}$, 调制转速大于平台实际转速时, 假目标图像横向发生扩展, 如图 6(a) 所示; 而当 $\Delta\omega = -0.02 \times 2\pi \text{ rad/s}$, 调制转速小于平台实际转速时, 假目标图像横向发生压缩, 如图 6(b) 所示。

从仿真结果中可以看出, 调制转速影响假目标图像横向形状大小, 从而影响假目标的逼真度和可信度。上述仿真中两组调制转速均偏离平台真实转速较大, 误差分别为 33.3% 和 66.6%, 所以扩展或压缩现象较明显, 以便于验证理论分析结果。

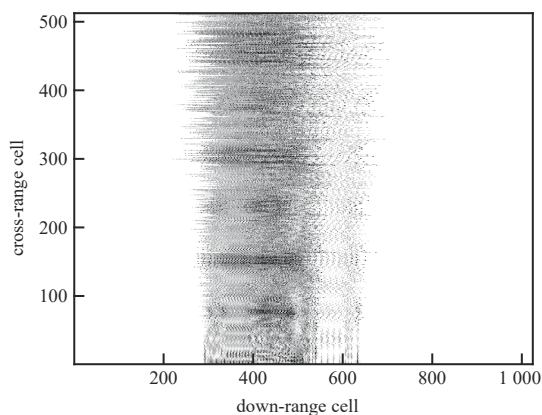


Fig.5(a) Mixed echo before motion compensation(13 m,13 m)
图 5(a) 混合回波运动补偿前(13 m,13 m)

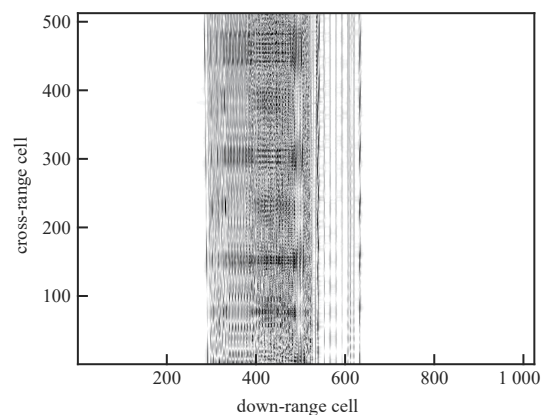


Fig.5(b) Mixed echo after motion compensation(13 m,13 m)
图 5(b) 混合回波运动补偿后(13 m,13 m)

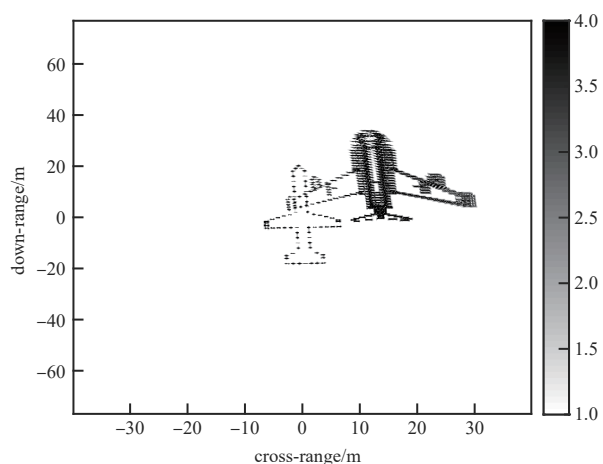


Fig.5(c) ISAR imaging of mixed echo(13 m,13 m)
图 5(c) 混合回波成像结果(13 m,13 m)

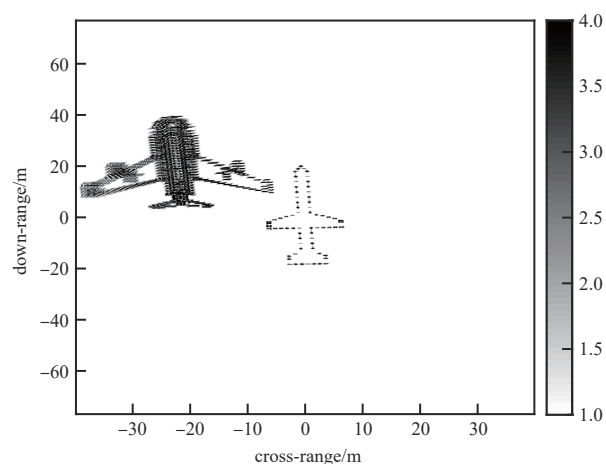


Fig.5(d) ISAR imaging of mixed echo(-20 m,20 m)
图 5(d) 混合回波成像结果(-20 m,20 m)

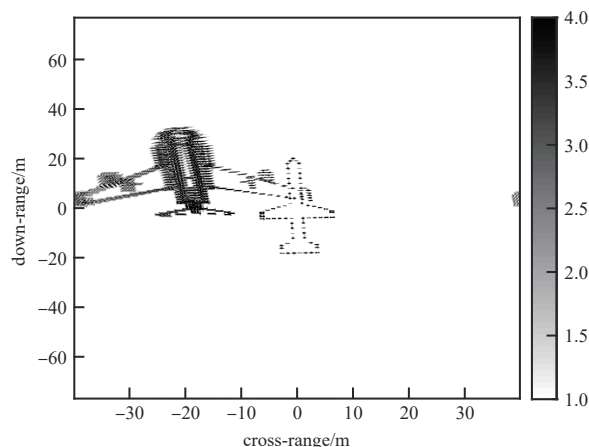


Fig.6(a) ISAR imaging of mixed echo(rad/s)
图 6(a) 混合回波成像结果(rad/s)

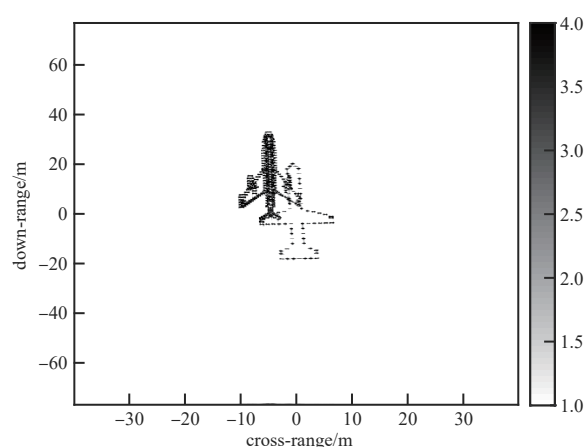


Fig.6(b) ISAR imaging of mixed echo(rad/s)
图 6(b) 混合回波成像结果(rad/s)

由前述分析可知，真假目标图像差异性主要受在调制过程中调制转速和未知的平台相对转速差异的影响。一般地，X波段 ISAR 横向成像要达到亚米级分辨力时，所利用的转角仅为几度，此时平台的真实转速一般是较小的。因此，根据侦察得到的雷达观测总时长，可以粗略地估计所需的调制转速。具体估计步骤如下：根据雷达横向分辨力和纵向分辨力大约相等的原则，首先估计一定横向分辨力条件下平台转角大小，然后根据雷达观测时长，选择调制转速。例如，上述仿真中，雷达纵向分辨力为 0.15 m，要达到 0.15 m 的横向分辨力时，所需平台转角约为 5.7° ，若侦察得到雷达观测时长为 0.5 s(仿真中雷达实际观测时长为 0.512 s)，则调制转速可选为

0.2 rad/s 左右, 而平台真实转速为 0.06π rad/s, 调制转速误差 $\Delta\omega/\omega=11.1\%$ 。仿真实验结果如图 7 所示。

可见, 只要初步估计出的调制转速偏离平台转速不太大, 其横向变形可控制在一定的范围内。如何进一步精确地估计并选择调制转速, 尤其是高速运动平台下假目标欺骗干扰信号调制问题将是后续 ISAR 图像欺骗干扰研究工作中的重要内容之一。

4 结论

本文基于文献[14]分析了运动平台下二维位置可控式 ISAR 假目标信号形成过程, 建立了假目标信号调制模型, 验证了经过运动补偿后, 混合回波在距离上基本对齐, 从而成像处理时能够形成与真实目标(平台)飞行轨迹类似的 ISAR 假目标图像, 其相对于真实目标的位置可控, 即通过在快慢时间域分别调制不同的横纵坐标偏移量可以将假目标图像在平台四周进行搬移; 调制转速将使得假目标图像发生横向变形, 在实际干扰过程中需要依据侦测信息, 合理设置调制转速。此外, 基于逐个散射点调制的干扰信号合成方法效率较低, 需要进一步研究位置可控且调制效率高的干扰信号合成方法。

参考文献:

- [1] 宁宇. 高速旋转目标逆合成孔径雷达成像方法[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019. (NING Yu. Methods of inverse synthetic aperture radar imaging of rapidly spinning targets[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2019.)
- [2] 金元华, 叶春茂, 鲁耀兵, 等. 一种基于 CFAR 检测和密度聚类的 ISAR 图像预处理方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(2): 278–283. (JIN Yuanhua, YE Chunmao, LU Yaobing, et al. A pre-processing method of ISAR images based on CFAR detection and density clustering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(2): 278–283.)
- [3] 杨磊, 夏亚波, 毛欣瑶, 等. 基于分层贝叶斯 Lasso 的稀疏 ISAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 623–631. (YANG Lei, XIA Yabo, MAO Xinyao, et al. Sparse ISAR imaging algorithm based on Bayesian-Lasso[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(3): 623–631.)
- [4] PAN Xiaoyi, WANG Wei, FENG Dejun, et al. On deception jamming for countering bistatic ISAR based on sub-Nyquist sampling[J]. IET Radar Sonar And Navigation, 2014, 8(3): 173–179.
- [5] 李筠, 吴杰. ISAR 欺骗干扰仿真与效果评估研究[J]. 现代雷达, 2018, 40(1): 86–91. (LI Jun, WU Jie. Simulation and effect evaluation of deception jamming[J]. Modern Radar, 2018, 40(1): 86–91.)
- [6] PAN Xiaoyi, WANG Wei, WANG Guoyu. Sub-Nyquist sampling jamming against ISAR with CS-based HRRP reconstruction[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(6): 1597–1602.
- [7] PAN Xiaoyi, LIU Jiaqi, CHEN Jiyuan, et al. Sub-Nyquist sampling jamming against chirp-ISAR with CS-D range compression[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1140–1149.
- [8] 李宏, 薛冰, 赵艳丽. 雷达欺骗干扰的现状与困惑[J]. 航天电子对抗, 2019(4): 1–5. (LI Hong, XUE Bing, ZHAO Yanli. State of the art and problems for radar deception jamming[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019(4): 1–5.)
- [9] 黎波涛, 董文锋, 都元松. 一种微动分量调制 ISAR 干扰方法[J]. 空军预警学院学报, 2017, 31(6): 413–417. (LI Botao, DONG Wenfeng, DU Yuansong. A micro-dynamic modulation jamming method against ISAR[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2017, 31(6): 413–417.)
- [10] PACE P E, FOUTS D J, EKESTORM S, et al. Digital false-target image synthesiser for countering ISAR[J]. IEE Proceeding—Radar Sonar and Navigation, 2002, 149(5): 248–257.
- [11] 黎波涛, 董文锋, 都元松. 基于时域延时的 ISAR 二维调制转发干扰[J]. 现代雷达, 2019, 41(7): 80–84. (LI Botao, DONG Wenfeng, DU Yuansong. Two-dimension modulation repeater based on time delay for ISAR[J]. Modern Radar, 2019, 41(7): 80–84.)
- [12] 唐峥钊, 董春曦, 畅鑫, 等. 基于拖曳式干扰机的 ISAR 微动散射波干扰方法[J]. 航空学报, 2018, 39(7): 322001–1–7. (TANG Zhengzhao, DONG Chunxi, CHANG Xin, et al. ISAR micro-Doppler scatter-wave jamming method based on towed jammer[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(7): 322001–1–7.)

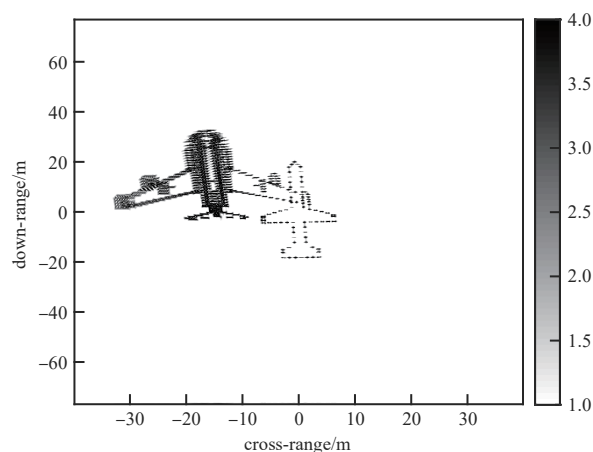


Fig.7 ISAR imaging of mixed echo ($\Delta\omega/\omega=11.1\%$)

图7 混合回波成像结果($\Delta\omega/\omega=11.1\%$)