DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.04.004

干扰位置可控的SAR散射波干扰方法

陈长风[1]，陈思阳[2]，董阳阳[2]，张　扬[1]，张钰清[1]，邹　猛[1]，王玉叶[3]

（1. 西南电子设备研究所，四川成都 610036；2. 西安电子科技大学电子工程学院，陕西西安 710071；
3. 中国电子科技集团公司第三十八研究所，安徽合肥 230088）

摘　要： 当前对SAR的散射波干扰产生的虚假图像位置较为固定，且受侦察参数误差和环境影响会出现一定偏移，难以准确覆盖在目标区域之上，针对这一难题，本文提出了一种对SAR的散射波干扰进行位置调制，产生位置可控的假目标的方法，此方法结合SAR成像的距离向和方位向两个维度的位置参数进行调制，实验结果表明，与传统对SAR的散射波干扰相比，本文方法产生的干扰图像可以精准覆盖在目标区域之上，使雷达端的成像结果中对真实目标和干扰图像的识别结果被混淆。

关键词： 合成孔径雷达；散射波干扰；精准干扰；电子对抗

中图分类号： TN974　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1672-2337(2024)04-0385-06

引用格式： 陈长风，陈思阳，董阳阳，等. 干扰位置可控的SAR散射波干扰方法[J]. 雷达科学与技术，2024，22(4)：385-390.

CHEN Changfeng, CHEN Siyang, DONG Yangyang, et al. A SAR Scatter-Wave Jamming Method with Controllable Jamming Position[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(4):385-390.

A SAR Scatter-Wave Jamming Method with Controllable Jamming Position

CHEN Changfeng[1], CHEN Siyang[2], DONG Yangyang[2], ZHANG Yang[1], ZHANG Yuqing[1], ZOU Meng[1], WANG Yuye[3]

(1. *Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu* 610036, *China*;
2. *School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an* 710071, *China*;
3. *The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei* 230088, *China*)

Abstract: At present, the position of false images generated by the scatter-wave jamming of SAR is relatively fixed, and there will be a certain deviation due to reconnaissance parameter errors and environmental influences, making it difficult to accurately cover the target area. In order to solve this problem, this paper proposes a method for modulating the position of scatter-wave jamming of SAR to generate controllable false targets. This method combines the position parameters of the distance and azimuth dimensions of SAR imaging for modulation. The experimental results show that compared with the traditional SAR scatter-wave jamming, the interference images generated by this method can accurately cover the target area, causing confusion in the recognition results of real targets and interference images in the radar imaging results.

Key words: synthetic aperture radar; scatter-wave jamming; precise jamming; electronic countermeasure

0　引　言

当前雷达发展领域中，合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar，SAR)的高分辨率探察成像功能在民用上得到了更广泛的实践应用。其中，民用无人机SAR系统的承载平台是航迹更灵活更不可预知的飞机体系，对关键目标的信息进行提取，对感兴趣区域成像，无人机SAR的实时反应速度和全面细致的覆盖能力更强。随着民用SAR技术的不断进步，如何隐藏己方最为关键的设施，干扰模糊SAR的某些成像细节，降低SAR对己方敏感区域关键目标识别和检测的精确度，从而实现对敏感区域的有效防护，仍是一个亟待解决的难题。

散射波干扰，又名弹射式干扰。在有源干扰方式中，散射波干扰的作用机制是当干扰机截获到SAR雷达进行探察照射的信号时，按照场景地

收稿日期：2024-01-05；修回日期：2024-05-09
基金项目：国家自然科学基金(No.61901332)

面散射点的分布情况和散射状态，对信号调制和转发，投射到待保护区域，借由空间杂质和一些无源干扰物的散射，产生进入SAR雷达的接收机的散射波干扰信号[1-4]。

基于散射波的干扰模式，2011年，刘业民等研究了散射波干扰技术应用于SAR的干扰方面，他们研究证明了散射波干扰可以结合对散焦图像进行的压制干扰和对虚假图像采用的欺骗干扰，继而达到复合干扰的效果[5]；2014年，Zhao等对干扰机截获的信号调制，使得干扰信号的时延和相位对齐SAR发射信号，扩大了在距离向上干扰的范围[6]；2020年，黄大通等在二维单音调制基础上提出了复合散射波干扰技术，在距离向和方位向上通过移频调制对截获到的SAR信号施加干扰，然后通过一定区域内密集分布的数个假目标组合形成干扰图像来掩护运动目标，但是，该方法下各个散射点之间的距离会受到约束，当该间距较大时，将失去对运动目标的掩护功能[7]；2023年，高冰洁提出了一种对抗广域目标检测系统中多普勒波束锐化成像方式的散射波干扰方式[8]；2023年，陶明亮等研究了星载SAR系统的散射干扰状态，分析了地面直射的干扰样式和星间的地形干扰样式的区别[9]。

在实施传统的散射波干扰技术过程中还是存在诸多问题，例如得到的干扰图像会散焦、失真、模糊，能够达到有效干扰的范围受限，干扰图像位置比较固定难以进行灵活变动和调控等[10]。针对这些问题，如何增进干扰图像的逼真程度，达到真假混淆效果，如何更加精准地控制干扰图像显示的位置，本文基于构建完成的干扰场景，提出距离向的调节系数和方位向的调节系数，以此联合二维向对散射波信号干扰的位置调制，使得干扰能量不逸散，集中于待保护的目标区域，达到了对干扰场景具体范围和干扰产生位置的精准控制，实现了干扰资源的高效利用[11-14]。

1 散射波干扰基本原理

散射波干扰产生的基本原理如下：己方干扰机选定干扰的目标照射区域，通过对截获到的敌方SAR发射信号设置相应延时，转发调制发射干扰信号，途径区域内的地物等产生散射，最后得到散射波干扰信号，该传播途径过程如图1所示。

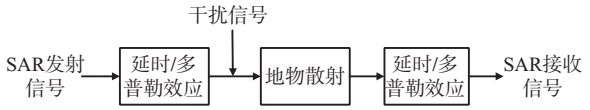


图1 散射波干扰的信号传播途径

根据图1，在无干扰情况下，雷达接收原始回波信号进行处理后生成真实的SAR图像。而在干扰存在的情况下，当SAR的波束照射到干扰机，干扰机截获该信号并调制转发，经由地物散射得到与雷达发射信号具有相干性的干扰信号并进入雷达接收机主瓣，该相干干扰信号可以和目标回波同样得到雷达接收机端匹配滤波的增益，因此对功率的要求相对宽松。

对SAR进行散射波干扰场景建模如图2所示，SAR所在机载平台高度为H，正以恒定速度v做匀速直线运动，以平台运动方向为y轴正方向，垂直于地面向上为z轴正方向，由右手定则确定x轴方向。图2中S为SAR平台位置，初始坐标为$(0,0,H)$，在t_a时刻S的坐标为$(0,vt_a,H)$；P为待保护目标区域中心，坐标为(x_P,y_P,z_P)；J为干扰机，坐标为(x_J,y_J,z_J)；I为干扰机照射区域中心，坐标为(x_I,y_I,z_I)；F为干扰信号经SAR成像后虚假目标，坐标为(x_F,y_F,z_F)。

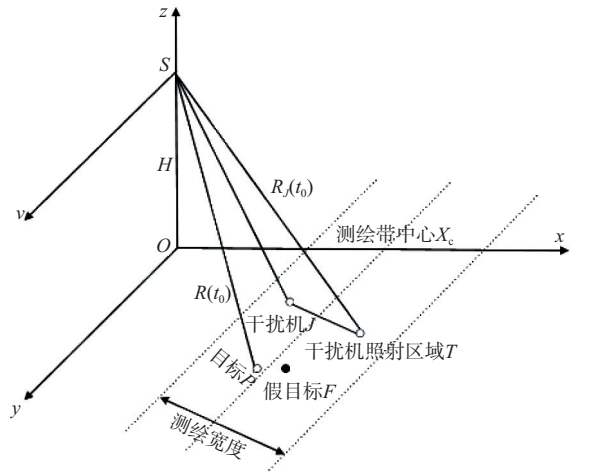


图2 对SAR的散射波干扰示意图

根据图2，干扰机J截获SAR信号并调制，照射区域为干扰机波束轨迹覆盖住的区域I，区域内部的散射点影响干扰信号形成散射波干扰，从而进入SAR接收机，经SAR成像处理后形成的虚假目

标F能掩盖真实目标P。

1.1 SAR回波信号模型

根据图2中的几何关系，雷达距真实点目标P的回波距离$R_P(t_a)$为

$$R_P(t_a) = |\overrightarrow{SP}| + |\overrightarrow{PS}| = 2\sqrt{x_P^2 + (vt_a - y_P)^2 + (H - z_P)^2} \quad (1)$$

于是，点目标P的回波信号表示为

$$s_P(t_r, t_a) = S_P\sigma_P \mathrm{rect}\left[t_r - \frac{R_P(t_a)}{c}\right] \cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi K_r\left[t_r - \frac{R_P(t_a)}{c}\right]^2\right\} \cdot \mathrm{rect}\left(t_a - t_0\right)\exp(-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}R_P(t_a)) \quad (2)$$

式中，S_P为基于P点处雷达功率密度的信号幅度，σ_P为P点的散射系数。

1.2 散射波干扰信号模型

散射波干扰信号的信号距离$R_J(t_a)$为

$$R_J(t_a) = |\overrightarrow{SJ}| + |\overrightarrow{JI}| + |\overrightarrow{IS}| = \sqrt{x_J^2 + (vt_a - y_J)^2 + (H - z_J)^2} + \sqrt{(x_J - x_I)^2 + (y_J - y_I)^2 + (z_J - z_I)^2} + \sqrt{x_I^2 + (vt_a - y_I)^2 + (H - z_I)^2} \quad (3)$$

则散射波干扰信号表示为

$$s_J(t_r, t_a) = S_I\sigma_I \mathrm{rect}\left[t_r - \frac{R_J(t_a)}{c}\right] \cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi K_r\left[t_r - \frac{R_J(t_a)}{c}\right]^2\right\} \cdot \mathrm{rect}\left(t_a - t_0\right)\exp(-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}R_J(t_a)) \quad (4)$$

式中，S_I为基于I点处雷达功率密度的信号幅度，σ_I为I点的散射系数。

根据$R_J(t_a)$和$R_P(t_a)$的差值对$s_J(t_r, t_a)$进行调制产生虚假点目标F，调制后的干扰信号$s_{F1}(t_r, t_a)$表示为

$$s_{F1}(t_r, t_a) = \left\{s_J(t_r, t_a) \otimes \delta(t_r - \frac{\Delta R_{PJ}(t_a)}{c})\right\} \cdot \exp\{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R_{PJ}(t_a)\} \quad (5)$$

式中，$\Delta R_{PJ}(t_a) = R_P(t_a) - R_J(t_a)$。

2 基于位置调制的散射波干扰方法

2.1 距离向位置精准控制

根据图2可知，SAR始终在距离向成像区域中线X_c上，且SAR的初始高度为H，设雷达下视角为β，那么有

$$\tan\beta = \frac{X_c}{H} \quad (6)$$

将虚假目标F的距离向位置x_F调整到x'_F，令$M_1 = x_F - x'_F$，则定义距离向调节系数M_2为

$$M_2 = M_1 \cdot \tan\beta \quad (7)$$

结合式(5)和式(7)，对$s_F(t_r, t_a)$进行调制，从而控制F在成像结果中的距离向位置，得到距离向位置调制后的干扰信号$s_{F2}(t_r, t_a)$表示为

$$s_{F2}(t_r, t_a) = \left\{s_{F1}(t_r, t_a) \otimes \delta(t_r - \frac{M_2}{c})\right\} \quad (8)$$

2.2 方位向位置精准控制

为了将虚假目标F的方位向位置y_F调整到y'_F，令$M_3 = y_F - y'_F$，定义方位向调节系数M_4为

$$M_4 = \exp\left\{M_3\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R_{\mathrm{total}}(t_a)\right)\right\} \quad (9)$$

结合式(5)和式(9)，对$s_F(t_r, t_a)$进行调制，从而控制F在成像结果中的方位向位置，得到方位向位置调制后的干扰信号$s_{F3}(t_r, t_a)$表示为

$$s_{F3}(t_r, t_a) = s_{F1}(t_r, t_a) \cdot M_4 = s_{F1}(t_r, t_a) \cdot \exp\left\{M_3\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R_{\mathrm{total}}(t_a)\right)\right\} \quad (10)$$

2.3 假目标位置二维联合控制

对散射波干扰信号产生的假目标F，进行距离向位置和方位向位置的联合控制，结合式(5)、(7)和(9)，得到假目标位置二维联合控制后散射波干扰信号表达式$s_F(t_r, t_a)$为

$$s_F(t_r, t_a) = G_F \cdot \left\{\begin{matrix} s_J(t_r, t_a) \otimes \\ \delta\left(t_r - \dfrac{\Delta R_{\mathrm{total}}(t_a) + M_1 \cdot \tan\beta}{c}\right)\end{matrix}\right\} \cdot \exp\left\{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R_{\mathrm{total}}(t_a) \cdot \left(M_3 - 1\right)\right\} \quad (11)$$

其中，M_1控制虚假点目标F的距离向位置，M_3控制虚假点目标的方位向位置。该二维联合调制通过在距离向上的时延调制和方位向上的移频调制达到精准控制干扰位置的目的。

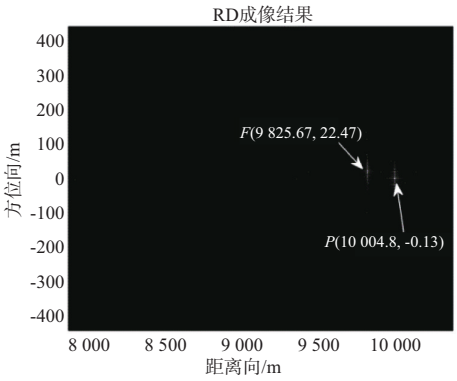
3 仿真实验与结果分析

本文采用RD（距离多普勒）算法分别对散射波干扰信号和目标真实回波信号进行对比成像，雷达平台初始坐标为（0, 0, 5 000）m，发射信号波长为0.3 m，脉冲宽度为5 μs，信号带宽为40 MHz，波束下视角为45°，飞行运动速度为200 m/s。根据仿真参数计算得出，距离向分辨率为3.75 m，方位向分辨率为2.5 m，即相距超过此间隔的点目标易被雷达分辨出来，而距离在此之间的点目标易被识别为同一目标，具有干扰混淆效果。设置干扰机J的坐标在(10 000, 10, 100) m处，干扰机照射区域的中心点I坐标在(9 800, 20, 0) m处。干扰机接收天线和发射天线的增益都设置为10 dB。本实验的仿真一共选取了距离向采样点1 024个，方位向采样点512个。设置目标区域中心点P在(10 000,0,0) m处。

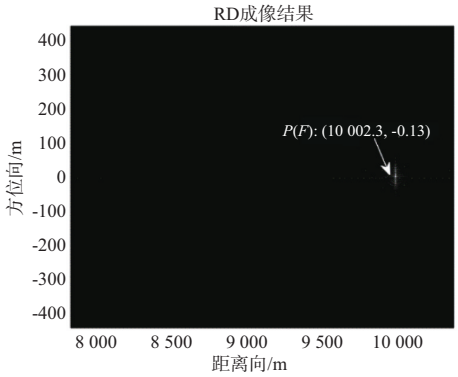
仿真实验1

采用通过位置调制后的散射波干扰信号对点目标P(0, 10 000, 0) m进行干扰，得到SAR成像图如图3所示，其中F点为虚假点目标的位置。

由图3(a)可以看出，传统方法下的散射波干扰产生的虚假点目标F(9 825.67, 22.47)（单位：m）与真实点目标P(10 004.8, −0.13)（单位：m）在距离向的位置差和在方位向的位置差分别为179.13 m和22.6 m，位置偏移明显。结合图3(b)，经过本文方法的散射波干扰信号位置调制后所产生的虚假点目标F(10 002.3, −0.13)（单位：m）与真实点目标P(10 004.8, −0.13)（单位：m）之间的距离向误差为2.5 m，干扰图像的位置偏移有明显改善。由雷达的分辨率可知，经过本文方法位置调制后，在SAR成像结果图中，虚假点目标F准确覆盖了点目标P。



（a）位置调制前

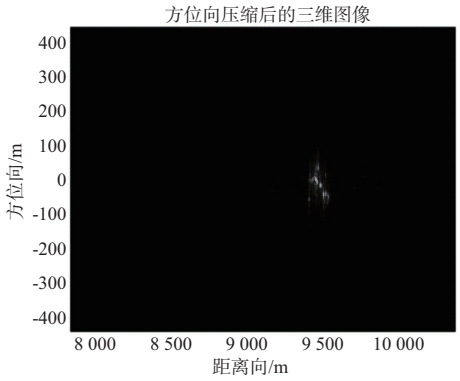


（b）位置调制后

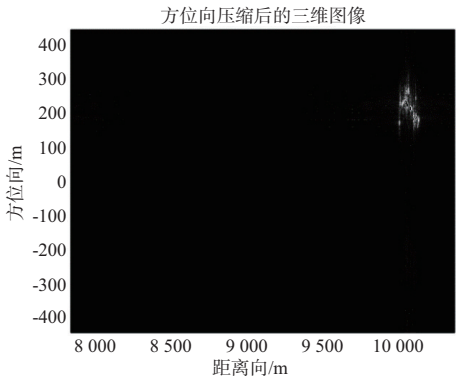
图3 对点目标进行散射波干扰

仿真实验2

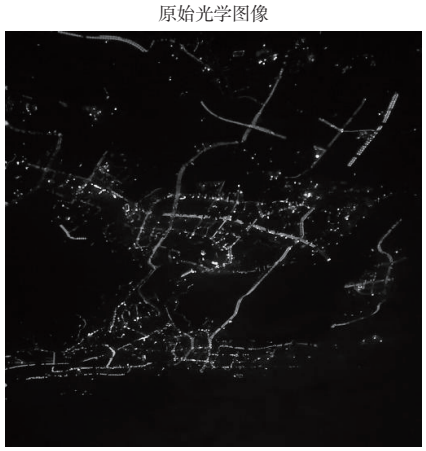
使用本文所提方法对散射波干扰信号位置调制，得到的干扰后SAR成像情况如图4所示。



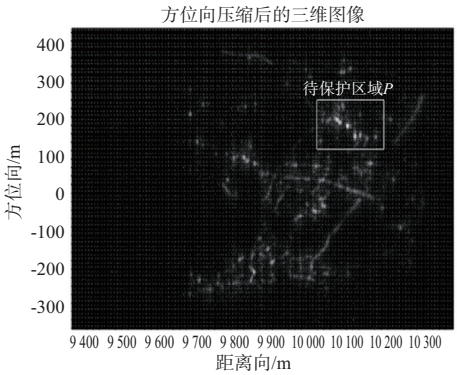
（a）位置调制前干扰图像



（b）位置调制后干扰图像



（c）SAR成像区域的光学图像



（d）位置调制后散射波干扰对SAR的干扰效果图

图4　散射波干扰对SAR成像的影响

由图4(a)可以看出，传统散射波干扰信号产生的虚假图像的中心点坐标在(0, 9 480) m处，和需要保护的区域相距较远，难以将干扰图像准确覆盖在需要保护的真实目标区域处。由图4(b)所示，经本文方法调制之后散射波干扰产生的虚假图像的中心点坐标在(230,10 050) m处，虚假图像可以准确地覆盖在需要保护的真实目标区域处。

图4(c)和图4(d)分别为SAR成像区域的原始光学图像和经过位置调制的散射波干扰对SAR雷达造成干扰的效果图，可以看出经过位置调制后干扰机产生的虚假干扰图像精准地覆盖了区域P，由于雷达接收的来自该区域的回波既包含真实目标又包含干扰回波，则真实目标的信息被一定程度掩盖，而此区域亮度高于附近的区域亮度，在SAR成像时此区域会被识别为干扰图像，以此增大了SAR对目标区域真假情况的识别难度，同时提高了散射波干扰的资源利用效能。

4　结束语

本文从散射波干扰的基本原理出发建立了干扰场景模型，构建了距离向和方位向的调节系数从而实现对散射波干扰信号的二维联合位置调制，仿真验证了位置调制后散射波干扰生成的干扰图像，以及干扰图像在真实图像上的干扰效果。该干扰成像效果不仅携带干扰机照射区域内的地物散射信息，还能够准确地覆盖待保护目标区域，克服了传统的散射波干扰技术难以掩护SAR成像区域指定位置上目标的缺陷，也克服了传统的散射波产生干扰图像亮度过高易被SAR雷达识别发现的缺陷，从而节省干扰资源，实现了干扰资源的最大化利用。

参考文献：

[1] 胡东辉，吴一戎．合成孔径雷达散射波干扰研究[J]．电子学报，2002，30(12)：1882-1884.

[2] 甘荣兵，王建国，何川，等．一种改进的对SAR的弹射式干扰方式[J]．电子与信息学报，2005，27(2)：256-258.

[3] 高晓平，雷武虎．SAR散射波干扰实现方法的研究[J]．现代雷达，2006，28(8)：22-24.

[4] 汪俊澎，李永祯，邢世其，等．合成孔径雷达电子干扰技术综述[J]．信息对抗技术，2023，2(Z1)：138-150.

[5] 刘业民，刘忠，代大海，等．散射波干扰对合成孔径雷达成像干扰效果的分析[J]．电波科学学报，2011，26(2)：400-406.

[6] ZHAO Bo, ZHOU Feng, TAO Mingliang, et al. Improved Method for Synthetic Aperture Radar Scattered Wave Deception Jamming [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2014,8(8)：971-976.

[7] 黄大通，邢世其，庞礴，等．对SAR-GMTI的二维单音调制散射波干扰[J]．系统工程与电子技术，2020，42(8)：1685-1694.

[8] 高冰洁．广域目标检测中SAR散射波干扰方法研究[D]．合肥：合肥工业大学，2023.

[9] 陶明亮，孙欢雨，刘艳阳，等．面向星载SAR系统的星间地形散射干扰研究[J]．信息对抗技术，2023，2(3)：64-73.

[10] LI Tao, CHEN Weidong, LU Guanghua,et al. A Study on Scatter-Wave Jamming for Countering SAR[C]//International Conference on Microwave & Millimeter Wave Technology, Builin:IEEE,2007:1-4.

[11] ZHANG Hengrui, MIN Lin, LU Jing, et al. An Improved

RFI Mitigation Approach for SAR Based on Low-Rank Sparse Decomposition: From the Perspective of Useful Signal Protection[J].Remote Sensing,2022,14(14):3278-3299.

[12] 王跃飞,董祺,毛新华.基于空时滤波的多通道SAR抗欺骗干扰算法[J].雷达科学与技术,2023,21(2):165-174.

[13] 李强,方庭柱,蔡永华.多模式斜视多通道SAR成像方法[J].雷达科学与技术,2022,20(4):421-428.

[14] 陈粤,禹卫东.星载SAR方位多通道TOPS成像模式参数设计[J].雷达科学与技术,2022,20(2):142-149.

作者简介:

陈长风 男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电子对抗总体技术。

陈思阳 女,硕士研究生,主要研究方向为SAR雷达认知干扰。

董阳阳 男,副教授、硕士生导师,主要研究方向为阵列信号处理和电磁频谱感知。

张 扬 男,博士研究生,工程师,主要研究方向为信号处理、电子对抗总体技术。

张钰清 女,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为电子对抗总体技术。

邹 猛 男,研究员级高级工程师,主要研究方向为电子对抗总体技术。

王玉叶 女,硕士研究生,主要研究方向为SAR散射波干扰。

(上接第384页)

报,2022,11(5):897-908.

[10] 陶臣嵩,陈思伟,肖顺平.基于深度学习模型的SAR图像间歇采样转发干扰检测[J].系统工程与电子技术,2023,45(11):3465-3473.

[11] 梁怿清,王小华,陈立福.基于深度学习的SAR目标检测方法[J].雷达科学与技术,2019,17(5):579-586.

[12] 黄大通,邢世其,李永祯,等.基于乘积调制的SAR灵巧干扰方法[J].系统工程与电子技术,2021,43(11):3160-3168.

[13] ERSOY O K,OZCAN C, OGUL I U. Fast Texture Classification of Denoised SAR Image Patches Using GLCM on Spark[J]. Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2020(28):182-195.

[14] THIYAGARAJAN A, GUNASEKAR K. An Improved Feature Selection Based Classifier for Prediction of Different Regions in SAR Images[J].Multimedia Tools and Applications, 2021,80(25):33641-33662.

[15] 付仲良,张文元,孟庆祥.灰度和纹理特征组合的SAR影像SVM分类[J].应用科学学报,2012,30(5):498-504.

[16] PERIASAMY S, RAVI K P, TANSEY K. Identification of Saline Landscapes from an Integrated SVM Approach from a Novel 3-D Classification Schema Using Sentinel-1 Dual-Polarized SAR Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 279: 113-144.

[17] 张皓宇,邢世其.SAR有源干扰对抗仿真软件设计与实现[J].舰船电子对抗,2023,46(6):102-110.

[18] 曾丽娜.SAR图像特征提取与检测、配准算法研究[D].西安:西北工业大学,2017.

[19] 陈博通.基于CFAR和两阶段候选区域网络的SAR舰船目标检测方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.

[20] LU Zhengwu, JIANG Guosong, GUAN Yurong, et al. A SAR Target Recognition Method Based on Decision Fusion of Multiple Features and Classifiers[J]. Scientific Programming, 2021(9):1-9.

作者简介:

张皓宇 男,硕士,主要研究方向为电子对抗。

全斯农 男,博士,副研究员,主要研究方向为电子对抗。

田元荣 男,博士,讲师,主要研究方向为电子对抗。

邢世其 男,博士,副研究员,主要研究方向为电子对抗。

朱 海 男,硕士,主要研究方向为电子对抗。