

基于重要性分布图的合成孔径雷达无源干扰调控方法

楚维钦¹, 余慧娟^{1*}, 谷捷¹, 李正¹, 谢昕², 张佳林¹

(1.北京航天发射技术研究所,北京 100076;2.电子科技大学,四川 成都 611731)

摘要:合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)以其全天时、全天候对观测区域进行高分辨率成像的特点,被广泛应用于地球测绘、国防军事、微波遥感等多个领域。因此,如何有效地对SAR进行干扰,以降低SAR系统对目标侦察识别的准确率,成为雷达对抗领域研究的难点问题。该文通过空间坐标转换的方法,生成用于表征场景中不同目标空间位置关系以及重要性程度的重要性分布图,并基于此设计了一种基于重要性分布图的SAR无源干扰调控方法,搭建了U-Net网络进行雷达干扰策略决策算法,以期达到以最小代价优先保护重要性更高的目标的目的。仿真实验表明,该方法通过构造重要性分布图对干扰问题进行可视化表征,并将先进人工智能算法用于无源运动干扰装置调控决策,实现了多干扰装置协同决策,显著提升了SAR无源干扰的智能化水平,在不同场景中,算法解算得到的干扰策略都能对目标区域进行很好的干扰,干扰条带完全覆盖住了每个场景中的区域。

关键词:合成孔径雷达;无源干扰;重要性分布图

中图分类号:TN958

文献标志码:A

文章编号:1002-4026(2025)06-0010-12

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



A passive jamming control method for synthetic aperture radar based on importance distribution maps

CHU Weiqin¹, YU Huijuan^{1*}, GU Jie¹, LI Zheng¹, XIE Xin², ZHANG Jialin¹

(1. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China; 2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) is widely employed in geospatial mapping, national defense, and microwave remote sensing due to its capability for high-resolution imaging under all-weather, all-day conditions. Consequently, developing effective jamming techniques to degrade SAR-based target reconnaissance and identification has become a critical challenge in radar countermeasure research. This study proposes a method to generate importance distribution maps through spatial coordinate transformation, capturing the spatial relationships and relative importance of targets within a scene. Based on this map, a SAR passive jamming control method is developed. A U-Net-based architecture is constructed to design a decision-making algorithm for radar jamming strategies, aiming to prioritize the protection of critical

收稿日期:2024-12-11 修回日期:2025-01-21

作者简介:楚维钦(1991—),女,博士,研究方向为现代防御技术。E-mail: chuweiqin1991@163.com, Tel: 18410206215

*通信作者,余慧娟(1985—),女,硕士,研究员,研究方向为现代防御技术。E-mail: yuhuijuan15@163.com, Tel: 13716526314

targets with minimal resource expenditure. Simulation results demonstrate that this method visualizes the interference problem by constructing an importance distribution map and uses advanced artificial intelligence algorithms for the control and decision-making of passive motion interference devices, achieving collaborative decision-making among multiple interference devices and significantly enhancing the intelligence level of SAR passive interference. Across different scenarios, the algorithm-generated jamming strategies effectively disrupt the target areas, with jamming strips fully covering the regions of interest in each case.

Key words : synthetic aperture radar; passive jamming; importance distribution map

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)作为一种微波传感器,能够穿透水汽云层甚至地表浅层,实现全天时、全天候工作。SAR通过发射脉冲电磁波并接收反射回来的信号,从而获取目标表面的反射信息。相比于光学成像技术,SAR具有不受天气、气候以及光线影响的成像能力。因此,全球各大军事强国都在积极推动以SAR为关键传感器的军事侦察系统的发展。国外代表性的星载SAR系统,包括美国“Lacrosse(长曲棍球)”SAR成像卫星、日本JERS成像卫星、ALOS-PALSAR成像卫星、欧洲太空局ERS-1和ERS-2(European Remote Sensing Satellite)雷达卫星、Sentinel成像卫星、德国TerraSAR-X成像卫星等^[1-2]。典型的机载SAR系统,又包括美国全球鹰SAR系统、捕食者系列SAR系统、Starlite无人机载SAR系统等^[3]。国内无人机载SAR领域也有由中国科学院电子学研究所研制的D3000多功能无人机载SAR系列^[4]。

国内外已发展的典型SAR成像系统通常具备多普勒波束锐化(Doppler beam sharpening, DBS)、条带SAR、聚束SAR和地面动目标指示(ground moving target indication, GMTI)成像能力。DBS和条带SAR模式成像分辨率较低,适用于大范围目标搜索;聚束SAR模式成像分辨率高,适用于小范围目标详查;而GMTI模式则主要用于捕获成像区域内的运动目标^[5]。这些SAR成像系统的持续区域侦察使得电子战双方的动态面临巨大的暴露风险,同时也给高价值目标带来了严重的生存威胁。因此,对SAR干扰技术的研究成为电子对抗领域的焦点问题。

对SAR干扰方式多种多样,如以压制式干扰机、欺骗式干扰机等为代表的有源干扰设备;以伪装网为代表的电磁伪装技术;以角反组、运动角反、箔条、箔丝为代表的无源干扰等。有源干扰具有干扰范围广、干扰信号可控、干扰效果显著等特点^[6]。2017年,刘永才^[7]以多模式、高分辨SAR的大场景欺骗干扰技术为课题,提出了一种基于离线计算、在线变异的大场景欺骗干扰实现技术。2023年,邢世其等^[8]针对场景欺骗干扰实时性较差的问题,提出了时频交叉乘积干扰生成技术,有效降低了调制运算复杂度。无源干扰以角反组、运动角反等为典型,通过无源器材的反射产生干扰回波,具有器材轻巧、响应较快、不易暴露等优势^[9]。角反射器结构与电磁超材料的结合,使得角反射器能够根据现实需求增加或降低雷达散射截面积(radar cross-section, RCS)。2016年,徐乐涛^[10]提出了一种基于间歇采样的成像雷达目标有源隐身方法。2020年,王俊杰^[11]设计并制作了具备X波段宽带调制特性的树型AFSS调制反射器。

电子战是指敌对双方为削弱、破坏对方电子设备的使用效能、保障己方电子设备发挥效能而采取的各种电子措施和行动。其发展经历了3个演变过程,即传统电子战、自适应电子战以及认知电子战^[12]。一般认为,认知电子战的核心在于电子战系统能够自主认知和理解环境和目标,从而持续实现对目标辐射源的高效干扰策略生成与优化^[13]。

人工智能AI技术为电子战带来了发展机遇。各项AI技术的快速进步使得电子战系统具备了推理、学习等认知能力,能够自主分析未知目标和环境,并做出有效的对抗决策。自2008年起,美军开始以提高电子战装备认知能力为核心,陆续启动了多个认知电子战项目的研究^[14],而中国也从2013年开始跟踪研究认知电子战技术^[15]。因此,本文提出了一种基于重要性分布图的合成孔径雷达无源干扰调控方法,通过构造重要性分布图对干扰问题进行可视化表征,将先进人工智能算法用于无源运动干扰装置调控决策,实现了多干扰装置协同决策,生成高效干扰策略,显著提升了SAR无源干扰的智能化水平。

1 重要性分布图

在战场环境中,需要被保护的目标往往分布在不同的地形上,比如山地、城市或平原。从物理特性来看,这些目标有着不同的电磁散射特性,不同目标也有着不同的战略重要性。因此,无源干扰策略的调控需具备灵活性,综合考虑保护目标的地理位置、物理特性和战术价值等。

因此,本研究提出一种基于重要性分布图的保护区域表征方法,以期在复杂战场环境中精确地分配干扰能量,从而在有限的资源条件下使防护效果最大化。

1.1 坐标系转换

在 SAR 仿真试验中,通常会根据某一实测数据平台位置信息进行仿真验证,对于实测数据,平台位置信息通常记录的是经度、纬度、高度,与本仿真中的成像坐标系不在同一坐标系下,因此涉及到经纬高与成像坐标系之间的转换(见图 1)。

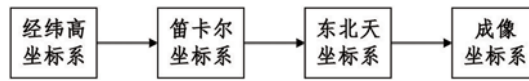


图 1 坐标系转换步骤

Fig.1 Workflow for coordinate system conversion

在给定车辆位置信息(经度、纬度、高度)的条件下,利用坐标系转换将车辆位置变换到成像坐标系,即距离-方位坐标系,步骤如下:

(1)经纬高坐标系-笛卡尔坐标系。假设经纬高坐标系位置为 (B, L, H) , B 代表大地经度, L 表示大地纬度, H 为大地高度。相对应的笛卡尔坐标系位置为 (x, y, z) , 则经纬高坐标系到笛卡尔坐标系转换表达式如下:

$$\begin{cases} x = (\nu + H) \cos B \cos L \\ y = (\nu + H) \cos B \sin L \\ z = ((1 - e^2) \cdot \nu + H) \sin B \end{cases}, \quad (1)$$

其中 e 为偏心率, e^2 为第一偏心率,且 $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$ 。其中, a 为长半轴, b 为短半轴, ν 为地球椭圆模型参数,计算公式如下:

$$\nu = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}。 \quad (2)$$

(2)东北天坐标系转换到载体坐标系。设 P 点在机载坐标系下的坐标为 $X' = (x', y', z')$, 则东北天坐标系到载体坐标系的转换公式如下:

$$X' = W_z \cdot W_x \cdot W_y \cdot X, \quad (3)$$

其中 W_x 、 W_y 、 W_z 为分别是围绕 x 、 y 、 z 轴旋转的旋转矩阵,定义如下:

$$\begin{aligned} W_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \\ W_y &= \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix}, \quad (4) \\ W_z &= \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别是围绕 x 、 y 、 z 轴旋转的角度,旋转顺序为 $z \rightarrow x \rightarrow y$,绕 z 轴旋转为航向角,绕 x 轴旋转为俯仰角,绕 y 轴旋转为翻滚角。

(3)空间坐标系转换为机载 SAR 成像坐标系。设目标中心点在空间直角坐标系坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ,其大地坐标系下的坐标为 (B_0, L_0, H_0) ,则空间坐标系任一点 (X, Y, Z) 转换为机载 SAR 坐标系的坐标 (X_n, Y_n, Z_n) 可以写为:

$$\begin{aligned} X_n &= -(X - X_0) \sin L_0 + (Y - Y_0) \cos L_0 \\ Y_n &= -(X - X_0) \sin B_0 \cos L_0 - (Y - Y_0) \sin B_0 \sin L_0 + (Z - Z_0) \cos B_0 \\ Z_n &= (X - X_0) \cos B_0 \cos L_0 + (Y - Y_0) \cos B_0 \sin L_0 + (Z - Z_0) \sin B_0 \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 重要性因子

重要性分布图反映了目标在空间中的分布特征及其受保护的程度,其构建过程依赖两个关键调控因素:一是将距离-方位成像结果转换为重要性分布时引入的重要性因子 σ ,用于衡量目标应受到的保护力度;二是覆盖因子 ϵ ,用来动态调整干扰覆盖区域的范围。两者共同构建了重要性分布图,下式给出了各目标的重要性因子与覆盖因子的综合调控方式。

$$I(d) = \sum_{n=k} (\sigma_k \cdot e^{-\frac{x_k^2}{2\epsilon_k}}), \quad (6)$$

其中, σ_k 、 ϵ_k 分别为第 k 个保护目标的重要性因子与覆盖因子。 d 为距离,表示当前点与目标位置之间的欧氏距离。

重要性因子 σ 通过改变不同区域在整个场景中的重要性分布来灵活调控干扰区域。令区域重要性因子 σ 分别为:

$$\sigma_a = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1] \quad (7)$$

即每个区域都拥有相同的重要性,都需要被重点保护,得到的重要性分布如图 2(a) 所示。当改变重要性因子 σ 为:

$$\sigma_b = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0] \quad (8)$$

则最左侧区域保护权重最低,最右侧最高,对应的重要性分布如图 2(b) 所示。在图 2 中,区域越亮说明其重要性因子越高,越需要重点保护。

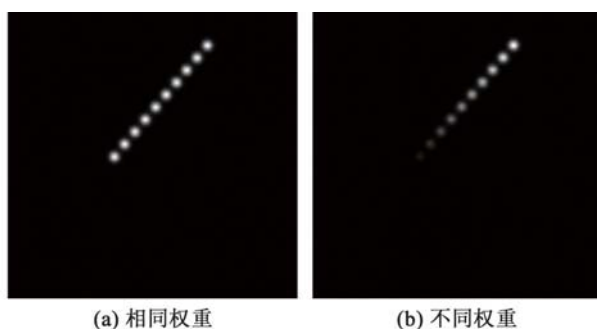


图2 距离-方位坐标系成像结果与重要性分布图

Fig.2 Imaging results and importance distribution map within the range-azimuth coordinate system

1.3 覆盖因子

覆盖因子 ϵ 用于动态调整覆盖区域范围,当 ϵ 越大时,目标车辆(或区域)的覆盖面积越大,反之, ϵ 越小,目标车辆(或区域)的覆盖面积越小。

图3直观展示了当覆盖因子 ϵ 逐步增大,将会对重要性分布图造成的影响。其中, σ_a 、 σ_b 如式(7)~(8)。

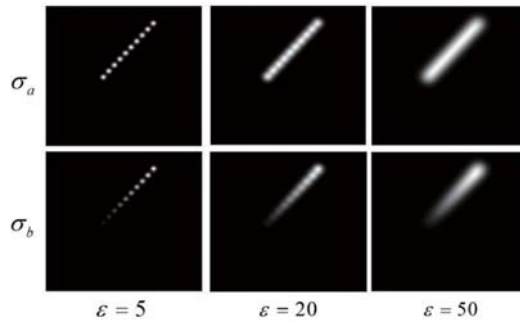


图3 不同覆盖因子对重要性分布图的影响

Fig.3 Impact of varying coverage factors on importance distribution maps

因此,覆盖因子 ϵ 对重要性分布图的影响体现在控制保护区的大小。当 ϵ 逐步增大,在分布图上,被覆盖的面积也随之增大,因此在干扰过程中,需要受到干扰的目标区域也会随之扩大。

2 基于重要性分布图的无源干扰调控方法

2.1 无源干扰调控框架

旋转角反射器作为无源干扰技术的典型代表,凭借其强 RCS 等特性,在电磁防护领域具有不可替代性,尤其适用于对固定高价值目标的持久遮挡。因此,本研究使用无人机搭载角反射器进行干扰的方案。通过对无人机平台上角反射器的旋转速度、角速度和半径进行精确调控,以模拟在不同运动参数下的角反射器干扰特性,从而实现对目标区域精准有效的干扰。

由于雷达干扰问题涉及高维数据和多约束条件,传统的最优化算法在求解过程中往往面临计算量大、收敛速度慢以及容易陷入局部最优的问题。基于此背景,本文提出一种基于 U-Net 的无源干扰策略决策算法,旨在通过深度学习技术实现对干扰策略的高效、智能化决策,进一步提升干扰效果,同时减少对非目标区域的干扰影响。其调控框架如图 4 所示。

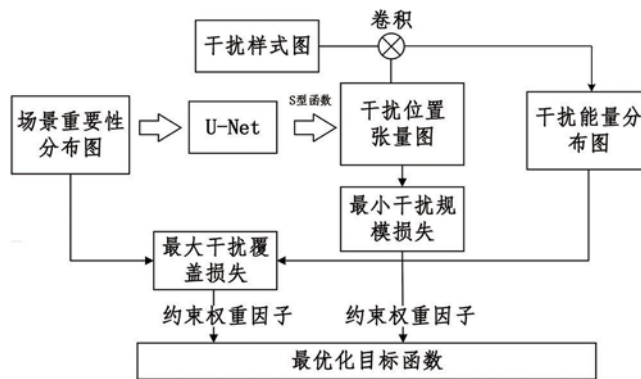


图4 无源干扰调控框架

Fig.4 Framework for passive jamming control

本算法以 400×400 的重要性分布图和干扰样式图为输入,输出干扰能量分布图,并据此直接给出最优干扰机数量、起始位置及旋转角速度、半径、方位向速度等参数。为校正因位置或径向速度造成的样式偏移,引入干扰位置张量图,各通道的最大值对应参数的最优位置。将该位置图与相应样式特征图卷积得到干扰特征张量,沿通道求和即可得到反映当前策略能量分布的干扰图。

2.2 基于 U-Net 网络的雷达干扰策略决策算法

考虑到 SAR 图像处理领域中深度学习技术的广泛应用及 U-Net 在小目标分割中的突出优势,本算法采用了改进的 U-Net 结构来实现干扰策略决策^[16-18],网络结构如图 5 所示。该网络以重要性分布图为输入,通过多

尺度特征提取和语义信息融合,将输入图像映射到具体的干扰策略参数空间,为后续的策略生成提供依据。

预处理后的 400×400 重要性分布图被输入 U-Net 网络,左侧编码器通过卷积和池化逐步提取图像的多层次特征,形成压缩特征模块,提供丰富的上下文信息。右侧解码器则通过反卷积和跳跃连接,将低级细节与高级语义有效结合,最终输出与输入同尺寸的图像。

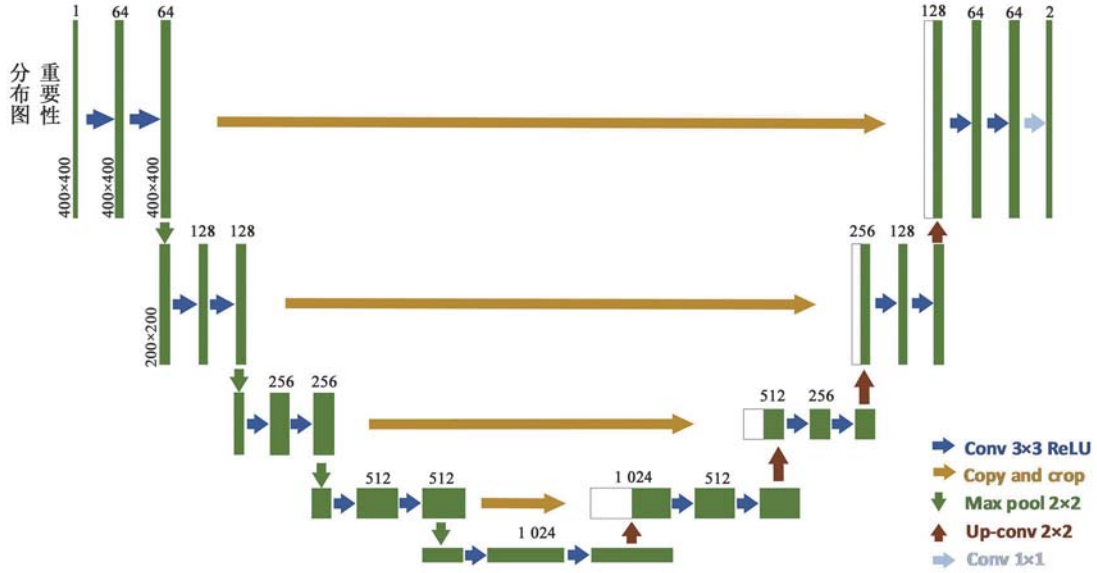


图 5 U-Net 网络结构

Fig.5 U-Net architecture

该决策算法中的最优化目标函数有两个,分别是最大干扰覆盖损失与最小干扰规模损失。最大干扰覆盖损失旨在确保干扰能量分布尽可能覆盖重要性区域。由于干扰样式库包含多种干扰样式,每种样式对应一个通道,网络输出 y 也是多通道结构,与干扰样式库 Φ 中的样式一一对应。优化目标是找到最优的干扰样式组合,使得累积的干扰能量分布最大程度匹配重要性区域,损失函数定义如下:

$$L_{\text{Cover}} = \left\| X_{\text{bool}} - \left(\sum_i y_i \otimes \varphi_i \right)_{\text{region}} \right\|_2^2, \quad (9)$$

其中, X_{bool} 表示重要性分布图的二值化结果, y_i 为第 i 个通道的干扰样式选择强度, φ_i 为对应的干扰样式特征图,最终的干扰覆盖结果由所有样式的加权组合得到。

最小干扰规模损失用于约束干扰设备的部署规模,使得在满足最大覆盖的前提下,干扰设备的部署尽可能稀疏。由于多样式干扰涉及多个通道,每个通道的输出 y_i 均需满足稀疏性约束,整体损失表达式如下:

$$L_{\text{Number}} = \alpha (\|y\|_1 + \mu \|f(y')\|_2^2) + \beta \|y \odot y \odot \dots \odot y - y\|_2^2, \quad (10)$$

其中, y' 为输出 y 布尔化之后沿着通道维相加的一维输出, f 为 S 型函数,将大于 1 的像素点置 1,将小于等于 1 的像素点置 0,以避免同一位置部署多个设备。哈达玛积项 \odot 用于高阶稀疏约束,参数 α 、 β 和 μ 用于调节损失项权重。

输出特征图经过滤波之后亮点数目即为无人机数目,亮点位置即为无人机在成像坐标系下的坐标。基于最大覆盖准则的损失函数表达式如下:

$$L = \lambda_1 L_{\text{Cover}} + \lambda_2 L_{\text{Number}}, \quad (11)$$

其中, λ_1 、 λ_2 为两个要素权重分配值,用来调整其损失的权重。

以重要性分布图作为输入,通入 U-Net 网络,得到 N 通道输出 y ,再将干扰模板 φ 与 y 进行卷积并叠加,可以得到干扰结果的包络样式。在进行干扰决策之后,根据输出 y 得到无人机在成像坐标系下具体位置和数量,根据选择模板得到无人机的具体飞行情况,两者相结合,最终可以解算出在最小无人机数目下的最优干扰。

例如,将图 6 所示的 3 种不同场景重要性分布图作为输入,利用雷达干扰策略决策算法生成干扰决策,最终得到的干扰效果具体如下图 7,即算法生成的最优干扰策略模拟 SAR 干扰结果。

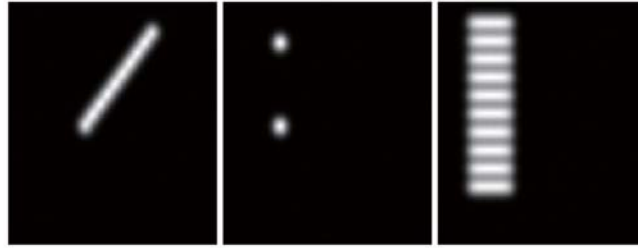


图 6 不同场景重要性分布图

Fig.6 Importance distribution maps across various scenarios



图 7 不同场景干扰决策后干扰效果

Fig.7 Jamming effects following jamming decisions across various scenarios

2.3 运动无源干扰调控量影响分析

在电子对抗领域,雷达角反射器是一种极具代表性的无源干扰诱饵。它凭借制作成本低、干扰效果显著等突出优势,在各类作战环境中得以广泛运用^[19]。

单个旋转角反射器仅可产生点状干扰,在距离向上难以实现较大范围的展宽。但沿距离向放置多个角反射器后,就能实现对 SAR 的区域干扰^[20-21]。在实际应用场景中,以 SAR 系统参数作为依据,合理安排旋转角反射器的数目、摆放位置,并选取恰当的半径与转速,这样才能实现对目标区域的有效干扰^[22-24]。

为了明确各个干扰调控量对无源角反干扰效果的影响,本节分别对各个调控量进行单独分析。其中,雷达中心载频为 3 GHz,工作在 L 波段,信号带宽 100 MHz,采样率为 1 200 MHz,采样点数为 10 000。

(1) 静止单角反干扰

图 8 为静止单角反在场景中心的干扰效果,表现为点状干扰特性,即图像中心产生了一个亮点。

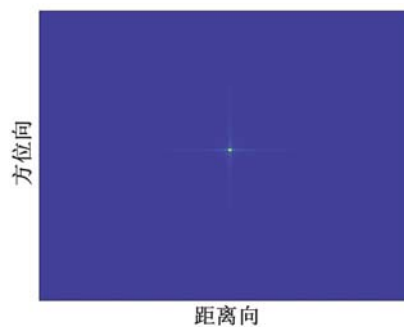


图 8 静止单角反干扰场景

Fig.8 Jamming scene of a single corner reflector in a stationary state

(2) 旋转角反调控量影响分析

当控制旋转角反 $v = 0 \text{ m/s}$, $\omega = 10\pi \text{ rad/s}$ 不变,沿距离向放置多个旋转角反射器,从左到右旋转半径从 0.01 m 增大到 1 m,得到的干扰条带如图 9 所示。可以看出,随着 R 增大,带来距离向的展宽,使得干扰覆盖范围增大,但能量也随之分散。

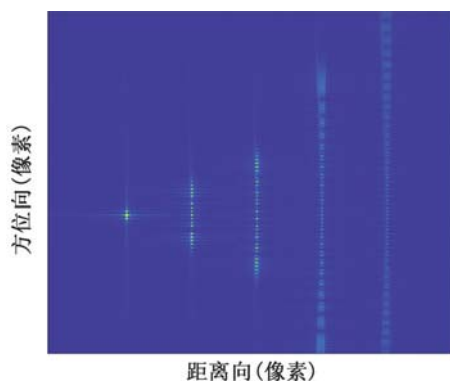


图 9 旋转角反射器在不同旋转半径下的成像结果

Fig.9 Imaging results for rotating corner reflectors with varying rotation radii

当沿距离向放置多个旋转半径和径向速度相同的角反射器,控制其以不同的角速度旋转,得到的干扰条带如图 10 所示。此时角反旋转半径 $R = 2\text{ m}$,速度 $v = 0\text{ m/s}$,角速度 ω 从 $4\pi\text{ rad/s}$ 增大到 $40\pi\text{ rad/s}$ 。随着角速度的增大,干扰点之间的间距相应增大,带来方位向的展览,从而产生方位向欺骗干扰作用。然而,一旦目标旋转角频率超过某一临界阈值,点目标就会过度分散,无法形成具有足够能量集中度的有效干扰。

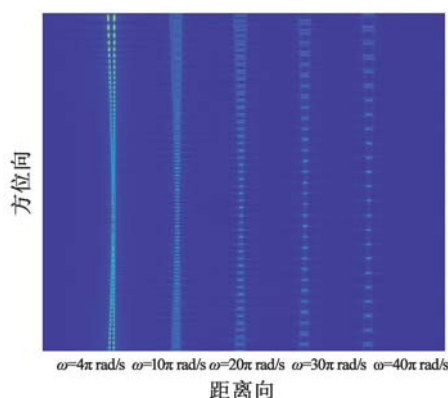


图 10 旋转角反射器在不同角速度下的成像结果

Fig.10 Imaging results for rotating corner reflectors at different angular velocities

(3)角反运动方式分析

当角反以不同的运动方式:直线运动(沿着距离向或方位向)以及圆周运动状态时,在相同场景下的干扰效果如图 11 所示。

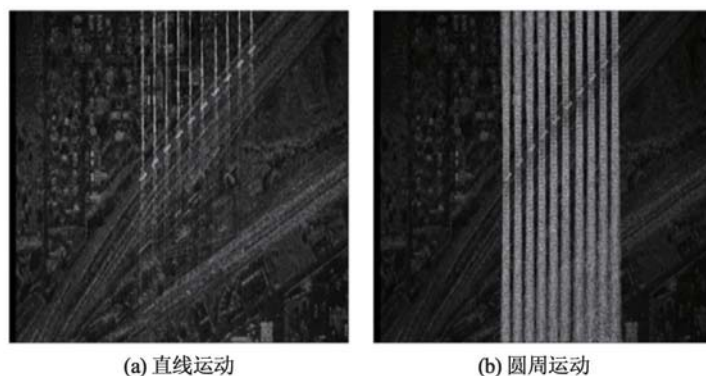


图 11 角反射器不同运动方式下成像结果

Fig.11 Imaging results for corner reflectors under various motion modes

当同时结合了圆周运动与距离向直线运动后,可以得到复合运动条件下的无源干扰效果,如图 12 所示。

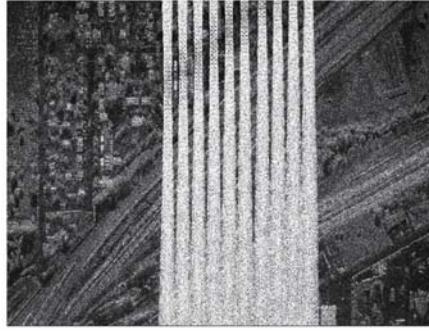


图 12 复合运动下的角反无源干扰效果图

Fig.12 Passive jamming effects of corner reflectors under compound motion

相对于单要素无源干扰,多种调控因素组合的多要素干扰能够充分平衡各种干扰特性的优势,从而获得更好的干扰效果。

2.4 无源干扰仿真

图 13 展示了 10 辆通过仿真构建的车辆,其呈现等间距排列。通过坐标变换,可获得这些目标车辆在距离-方位坐标系下的成像结果。进一步将重要性分布图输入 U-Net 网络进行处理,可输出最优的干扰无人机数量及其运动方式,从而完成雷达干扰策略决策。

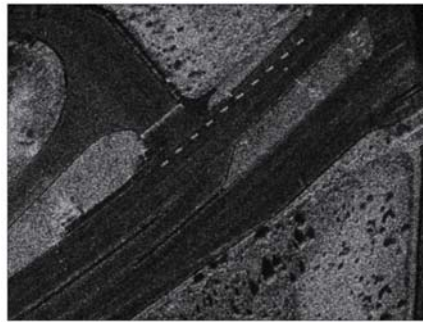
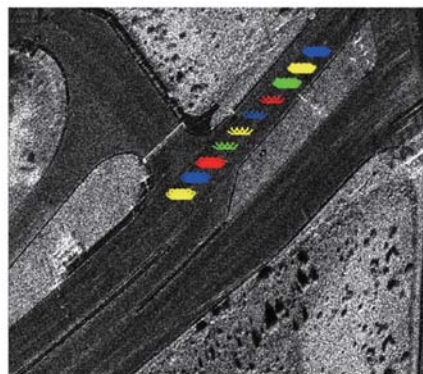


图 13 SAR 场景及车辆

Fig.13 SAR scenarios with vehicles

如图 14 所示,最优干扰策略为 10 辆干扰无人机以半径 $R = 10 \text{ m}$,角速度 $\omega = 10\pi \text{ rad/s}$,径速度 $v = 0 \text{ m/s}$ 进行匀速圆周运动。它们在场景中的运动轨迹与起始坐标如图 14 所示。



注:彩色色块为干扰无人机的飞行轨迹。

图 14 干扰无人机飞行轨迹

Fig.14 Simulation imaging results for UAV flight trajectory

此时,所选取的雷达无源干扰模板是干扰策略库中如图 15(a)所示的模板,而模拟得到的最优干扰效果如图 15(b)。

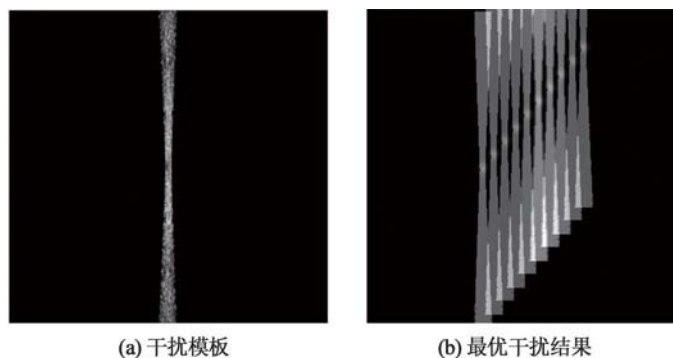


图 15 干扰样式图与最优干扰结果

Fig.15 Jamming patterns and optimal passive jamming results

从图 15(b)中看出,干扰结果很好地覆盖了被保护目标。在场景中进行 SAR 无源干扰成像,得到结果如图 16。该干扰策略能对目标区域进行很好的干扰,干扰条带完全覆盖住了场景中需要保护的区域。



图 16 无源干扰仿真成像结果

Fig.16 Simulation imaging results for passive jamming

为验证算法的可靠性和有效性,针对不同雷达平台(星载、机载)及车辆行驶场景,开展了无源干扰调控仿真。图 17(a)显示的是星载 SAR 在聚束模式下的成像场景,公路上有十辆等间距的车辆(红框标注),为需保护的目標区域。该场景中,采用 10 架干扰无人机进行圆周运动模拟,图 17(b)为其无源干扰成像结果。干扰后,车辆已难以识别,表明该策略有效屏蔽了目标区域。

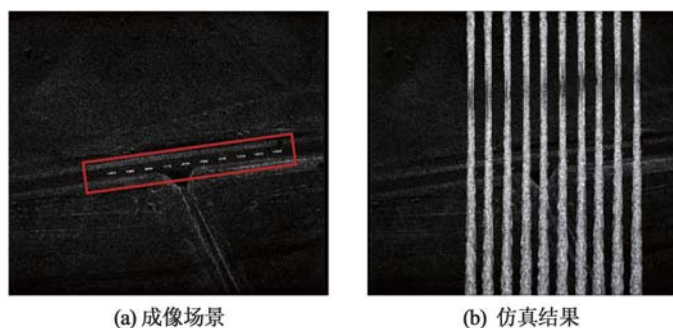


图 17 聚束模式星载 SAR 场景与无源干扰仿真结果

Fig.17 Simulation results for spaceborne SAR scenario and passive jamming in bunching mode

图 18 展示了聚束模式下的机载 SAR 场景,公路上零散分布着 3 辆处于不同状态的车辆(红框所示),作为需保护的目標。通过干扰决策网络计算出最优干扰策略,确定使用 2 架干扰无人机。最终的干扰仿真成像结果如图 18(b)所示,3 辆目标车辆均被干扰条带覆盖,达到了预期的干扰效果。

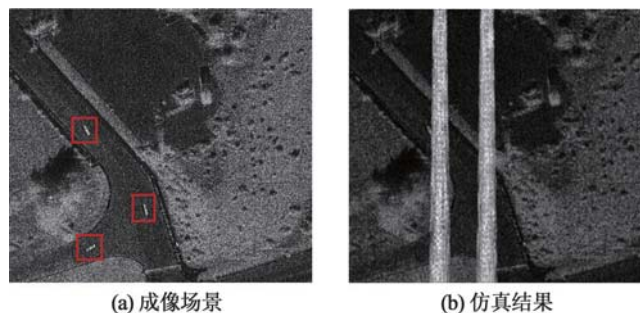


图 18 聚束模式机载 SAR 场景与无源干扰仿真结果

Fig.18 Simulation results for airborne SAR scenario and passive jamming in bunching mode

仿真结果表明,在多个场景中,算法解算得到的干扰策略均能有效覆盖目标区域,干扰条带实现了全面遮蔽。这说明该算法适用于多台无源运动干扰装置的协同干扰策略输出,并能不同雷达平台(星载、机载)及多种工作模式下实现对目标区域的有效干扰。

3 结论

本文围绕高价值目标防护需求,研究无源干扰技术及调控方法,提出基于重要性分布图的 SAR 无源干扰调控方法。该方法利用重要性分布图表征干扰区域、SAR 雷达空间位置和干扰重要程度,以此作为输入搭建 U-Net 网络进行干扰策略决策,实现多干扰装置协同,显著提升了 SAR 无源干扰的智能化水平。基于重要性分布图的合成孔径雷达无源干扰调控方法可实现对多个无源运动干扰装置的精确调控,实现对 SAR 系统的有效干扰。通过变换域重要性分布特征图降低最优化问题维度,将位置信息转化为张量图,利用深度学习框架进行最优决策,进一步提升了决策的智能化和可靠性。相较于传统基于贪婪策略的最优化求解方法,本方法将干扰效果、规模、耗能等因素纳入求解过程,实现多目标最优。并且,基于深度学习框架的灵活性,可根据实际问题调整、扩展最优化损失,进一步提升最优决策的科学性。

随着雷达技术的不断发展与应用场景的日益复杂,仍有诸多方面值得深入研究。在干扰技术融合方面,需积极探索无源干扰与有源欺骗、射频隐身等技术的深度融合路径,构建更为高效的干扰体系,平衡各技术间的优势与劣势,实现协同增效,从而有效应对复杂多变的雷达探测环境。在场景适应性研究领域,当前研究多基于仿真,后续需深入钻研如何使 SAR 无源干扰调控方法具备实时感知并适应动态场景的能力,如面对目标快速移动、环境突变等情况时,能够迅速做出响应,进一步提升该方法的实时性与适应性。

参考文献:

- [1] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10. DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20015.
- [2] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229-240. DOI: 10.11999/JEIT151116.
- [3] 曲长文, 何友, 龚沈光. 机载 SAR 发展概况[J]. 现代雷达, 2002, 24(1): 1-10. DOI: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2002.01.001.
- [4] 王岩飞, 刘畅, 詹学丽, 等. 无人机载合成孔径雷达系统技术与应用[J]. 雷达学报, 2016, 5(4): 333-349. DOI: 10.12000/JR16089.
- [5] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [6] 李永祯, 黄大通, 邢世其, 等. 合成孔径雷达干扰技术研究综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 753-764. DOI: 10.12000/JR20087.

- [7]刘永才. 对多模式高分辨合成孔径雷达的大场景欺骗干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.000037.
- [8]汪俊澎, 邢世其, 李永祯, 等. 基于时频交叉乘积的调频连续波 SAR 干扰方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(6): 1651-1657.
- [9]李武旭. 雷达角反射器设计和应用[J]. 电子产品世界, 2023, 30(3): 56-59. DOI:10.3969/j.issn.1673-4793.2019.01.002.
- [10]徐乐涛. 基于间歇调制的成像雷达目标特征控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [11]王俊杰. 成像雷达目标特征电磁调控技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2020.000309.
- [12]周一宇, 安玮, 郭福成, 等. 电子对抗原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [13]黄知涛, 王翔, 赵雨睿. 认知电子战综述[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(5): 1-11.
- [14]苏周, 韩俊, 刘飞, 等. 美军认知电子战发展特点和趋势研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(11): 1057-1064. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2022.11.004.
- [15]张春磊, 杨小牛. 认知电子战初探[J]. 通信对抗, 2013, 32(2): 1-4.
- [16]殷晓航, 王永才, 李德英. 基于 U-Net 结构改进的医学影像分割技术综述[J]. 软件学报, 2021, 32(2): 519-550. DOI: 10.13328/j.cnki.jos.006104.
- [17]张欢, 仇大伟, 冯毅博, 等. U-Net 模型改进及其在医学图像分割上的研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0200005. DOI: 10.3788/LOP202259.0200005.
- [18]黄晓鸣, 何富运, 唐晓虎, 等. U-Net 及其变体在医学图像分割中的应用研究综述[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(5): 567-576.
- [19]赵锋, 邱梦奇, 艾小锋, 等. 典型角反射器单/双基地 RCS 特性对比分析[J]. 现代防御技术, 2023, 51(1): 50-58. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2023.01.007.
- [20]孙光才, 白雪茹, 周峰, 等. 一种新的无源压制性 SAR 干扰方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 610-613. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5043.2006.03.003.
- [21]朱燕. SAR-GMTI 雷达干扰技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [22]周阳, 毕大平, 沈爱国. 对 SAR-GMTI 的大区域遮蔽有源-无源协同干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1004-1011. DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2018.05.07.
- [23]孙光才, 周峰, 邢孟道. 一种 SAR-GMTI 的无源压制性干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 39-44. DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2006.01.011.
- [24]张刚, 李涛. 一种基于旋转角反射器的双基地前视 SAR 干扰方法[J]. 无线电工程, 2019, 49(6): 488-493.

