DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.04.002

SAR干扰技术综述

胡泽宾

（中国电子科技集团公司第三十八研究所，安徽合肥 230088）

摘　要： 合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）是一种全天时全天候并具备高分辨率的成像设备，在军用民用领域均有重要的应用价值。SAR在军事上被广泛地应用于发现各类战略性目标，如坦克、部队、巡逻艇、敌方武器系统部署以及其他重要的战略物资。在民用领域，SAR被用于地形测绘、预防各种天气现象如冰雹、洪水、干旱、飓风等。SAR技术的不断进步为重要军事目标的防御工作带来了极大的挑战，如何对SAR进行有效干扰，降低SAR对军事目标的检测与识别性能，从而保障军事目标能安全、高效地进行军事任务，仍是一个亟待解决的难题。本文阐述了对SAR干扰技术的发展现状，分析了现阶段SAR干扰技术的挑战与难点，并对其发展趋势进行了展望，以期为相关领域的研究人员提供有益参考。

关键词： SAR对抗；有源干扰；欺骗干扰；干扰技术

中图分类号：TN972　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-2337(2024)04-0369-08

引用格式：胡泽宾.SAR干扰技术综述[J].雷达科学与技术，2024，22(4)：369-376.

HU Zebin. Review of SAR Jamming Technology[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(4): 369-376.

Review of SAR Jamming Technology

HU Zebin

(*The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei* 230088, *China*)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) has significant application value in both military and civilian, due to its excellent resolution imaging ability and good adaption to various time and weather. In the military field, SAR is widely used to discover various strategic targets, such as tanks, troops, patrol boats, deployment of enemy weapon system and other important strategic materials. In the civilian field, SAR is used for topographic mapping, preventing various weather phenomena such as hail, floods, droughts, hurricanes and so on. The continuous progress of SAR technology has brought great challenges to the defense of important military targets. How to interfere with SAR and reduce its detection and recognition performance on military targets, so as to guarantee that these targets can carry out military tasks safely and efficiently, is still an urgent problem to be solved. This paper expounds the development status of SAR jamming technology, analyzes the challenges and difficulties of SAR jamming technology at the current stage, and looks forward to its development trend, in order to provide useful reference for researchers in related fields.

Key words: SAR countermeasure; active jamming; deception jamming; jamming technology

0　引　言

目前合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）已经在战争场景中得到普遍使用，例如巴以冲突、俄乌战争、利比亚战争、伊拉克战争和科索沃战争等现代化战场。由于具备高分辨成像能力且能全天时、全天候地工作，SAR成为了搜集敌方情报的有效工具，并发挥了显著作用[1-2]。为了完成不同的任务，可以在不同的平台上搭载SAR：星载SAR可以持续不间断地监视全球各地，典型的有美国的“长曲棍球”SAR成像卫星和“未来成像系统（FIA）”，德国的TerraSAR成像卫星、TanDEM-X成像卫星和SAR-Lupe卫星系统，加拿大的RADARSAT-1/2卫星和RCM卫星星座，欧空局的ERS-1/2、ENVISAT卫星和“哨兵”系列卫星（Sentinel），英国的NovaSAR-S/X，印度的NISAR、RISAR成像

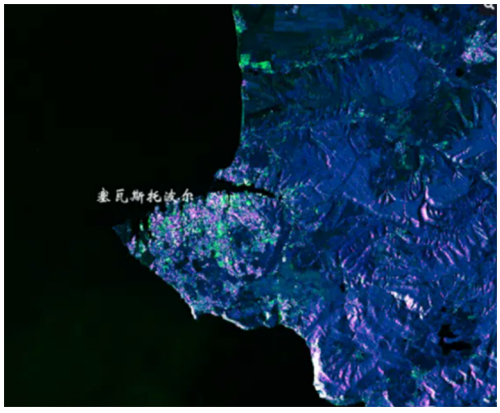
收稿日期：2023-12-22；修回日期：2024-06-18

卫星，日本的PALSAR成像卫星，意大利的COSMO-Skymed星座系统以及俄罗斯的Kondor-E卫星等。而机载SAR可以根据实际作战需求进行灵活调整，典型的有美国的“全球鹰”无人机、“捕食者”系列无人机、各种战斗机如F-16、F-22、F-35和印度光辉战斗机等；弹载SAR主要用于引导导弹的攻击，提高其命中目标的概率，主要有美国WAS SAR导引头、俄罗斯“白杨-M”地对地洲际导弹、德国MMW SAR、法国汤姆逊SAR匹配制导等；车载SAR主要用于对车的行驶环境进行成像，提供在障碍物复杂环境下的环境态势。

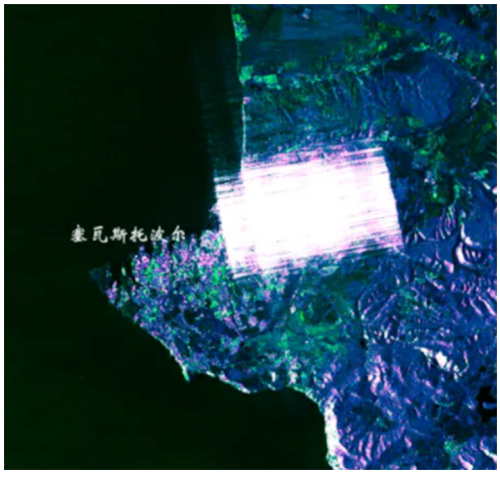
这些搭载着SAR系统装备的出现，使得高价值战略目标面临着巨大的生存威胁，如何降低SAR对高价值战略目标的检测识别能力，从而保证高价值战略目标能够安全、高效地进行军事任务，是一个亟待解决的难题。SAR干扰通常被分为两大类：有源干扰和无源干扰[3]。有源干扰因其干扰范围广、干扰信号灵活可控、干扰效果显著等优点，一直是世界各国研究SAR干扰的热点问题。本文从有源干扰的角度，分别阐述了干扰SAR和干扰SAR-GMTI这两种模式的SAR干扰研究情况，并对未来SAR干扰技术的发展方向进行了展望。

1 SAR干扰技术发展

20世纪末，国内外开始研究对SAR的有源干扰技术，主要针对的目标是星载SAR。1989年，Goj[4]最早开展了对SAR噪声干扰的研究，分析了干扰机在空间中的位置这一参数信息对干扰效果的影响。1990年，Condley[5]在对噪声干扰进行可行性分析的基础上，讨论了各种参数如干扰机发射功率、接收灵敏度对SAR干扰效果的影响。1995年，梁百川[6]分析了阻塞式、瞄准式和随机脉冲等3种干扰方法在SAR干扰领域的可行性，并用仿真手段对此进行了验证。1997年，陈宁等[7]基于SAR噪声干扰分析了干扰有效辐射功率对干扰效果的影响，并研制出了大功率SAR干扰机。2000年，Ekestorm等[8]首先对截获的SAR信号进行相位和幅度调制形成了SAR欺骗干扰信号，在SAR成像结果中产生了虚假目标，这启发了后来者对SAR欺骗干扰的思路。2002年，胡东辉等[9]针对SAR提出了散射波干扰这一种新的干扰思路，利用仿真手段证明了该方法生成的干扰图像所包含的地物信息比其他干扰方法生成的干扰图像更丰富。2005年，李江源等[10]针对SAR提出了一种在时域、频域和多普勒域对保护区域形成干扰信号有效覆盖的类杂波干扰[11]。2006年，张锡祥院士[12]将SAR干扰方程与对常规脉冲雷达干扰方程进行统一，从而得到了适用不同雷达体制的干扰统一方程。2010年，吴晓芳等[13]采用慢时间域上的间歇性采样在SAR图像上生成了方位向间距相等的假目标串。同年，Lv[14]和Ye等[15]则采用慢时间域上的随机噪声样本卷积，在SAR图像上生成了距离向位置可控的压制条带。图1为欧空局“哨兵1号”卫星（Sentinel-1）在2023年11月多次拍摄的克里米亚地区的图像，可以发现卫星受到明显干扰。



（a）受到干扰前



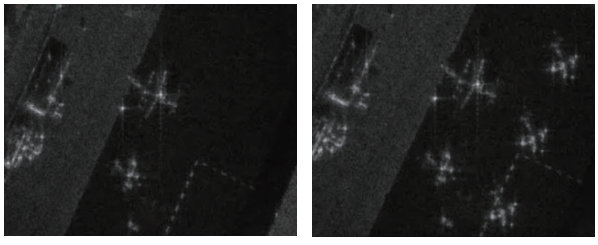
（b）受到干扰后

图1 “哨兵1号”卫星成像结果（克里米亚地区）

近年来,SAR 干扰技术蓬勃发展,研究重心逐渐从压制干扰向欺骗干扰过渡,相继出现了很多新的SAR有源干扰思路和方法,下面分别从以下几个角度对近年来发展的SAR干扰技术进行展开。

1.1　SAR场景欺骗干扰

干扰机截获SAR发射信号后,将该信号与预先设置的场景模板进行合成处理,然后转发给SAR,使得在SAR图像中的某一区域出现虚假场景图像,遮盖了真实目标,或者导致敌方雷达对真实目标的误判,形成“以假乱真”的效果,如图2所示,分别为SAR受到场景欺骗干扰前后的成像结果图。国内最早由王盛利等[16]在2003年提出对SAR进行有源欺骗干扰来生成虚假场景图像的方法,但该方法需要的计算量大、耗时长,这导致战场环境中要求的实时性难以得到满足。针对这一问题,孙光才等[17]在2009年通过将图像预处理后的虚假场景与截获SAR回波信号相卷积,产生了欺骗干扰信号,保证了SAR欺骗干扰的实时性。2013年,刘庆富[18]提出了对SAR回波信号进行乘积调制的干扰方法,进一步降低了卷积所需要的实时运算量,更加适用于生成大虚假场景干扰图像。2019年,Chang等[19]将大的虚假场景模板切割成多个小场景模板,然后对其进行延时和移频处理,更进一步降低了虚假场景干扰所需的计算量。2022年,戴长俊[20]将干扰信号的生成过程分成了三步,并利用离线辅助的方式完成了部分运算,这样大大降低了场景欺骗干扰的计算复杂度,提高了干扰的效率。2023年,纪朋徽等[21]在对SAR回波信号进行方位向乘积调制的基础上,再进行距离卷积形成虚假场景,不仅降低了SAR虚假场景干扰对实时调制计算量的要求,相比于SAR二维乘积干扰[18],还扩大了虚假场景的范围。

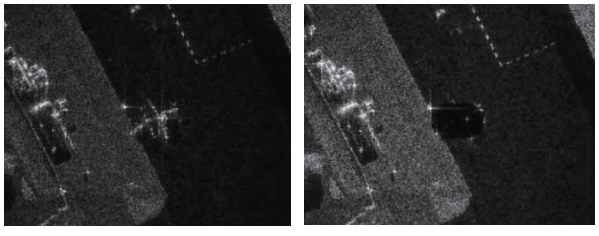


(a) 干扰前　　(b) 干扰后

图2　SAR场景欺骗干扰仿真结果

1.2　SAR有源对消干扰

传统的有源欺骗干扰方法往往采用假目标来对出现在SAR成像范围内的保护目标进行掩护,保护目标仍存在于SAR图像上。这种情况下,若干扰机对SAR的侦察过程中对侦察参数估计不准确,将出现虚假目标偏离预设位置的情况,进而暴露保护目标。针对这一问题,在2015年,Xu等[22]提出了SAR有源对消干扰方法,利用干扰机所截获的SAR回波信号,产生与其幅度、频率、延时相等相位相反的干扰对消信号,该干扰信号经SAR成像后会对消在SAR图像上保护目标位置的回波信号,达到隐藏保护目标的效果。2016年,徐乐涛等[23]利用间歇采样技术对有源对消信号进行处理,这样不仅对消了SAR回波信号,还在SAR图像上形成了多个假目标,进一步隐藏了保护目标的位置信息,得到的仿真结果如图3所示。2018年,Wu等[24]对有源对消信号进行了非周期间歇采样处理,在参数失配的情况下也达到了较好的欺骗干扰效果。2023年,周其阵[25]提取保护目标周围环境的后向散射系数并形成了欺骗模板,将其制成欺骗信号后与有源对消信号一起转发形成干扰信号,不仅对消了SAR图像中保护目标位置处的真实信息,还在该处生成了虚假图像,提升了干扰效能。



(a) 干扰前　　(b) 干扰后

图3　SAR有源对消干扰仿真结果

1.3　多接收机协同干扰

在实施SAR欺骗干扰前,一般需要事先获取SAR平台的运动速度和航向、SAR斜视角及SAR到干扰机的距离等重要参数。对这些参数的准确估计往往决定了对SAR欺骗干扰效果的好坏,这导致对侦察设备的要求较高。为了解决这个问题,Zhao等[26-28]基于多接收机协同技术讨论了SAR

欺骗干扰方法，利用几部侦察接收机在空间中的位置关系及它们侦察到同一SAR信号的到达时间差，巧妙地降低了对单接收机侦察能力的要求。然而，随着虚假目标与干扰机之间距离的增大，该方法所生成的虚假图像的方位向图像开始散焦甚至变形。针对这一问题，2022年，李永祯等[29]分析了多接收机之间的最佳布局问题，同时通过研究干扰方程中影响虚假目标的参数简化了干扰方对侦察参数的需求量，随着在SAR图像中生成的虚假目标与实际干扰机之间的距离逐渐增大，假目标在方位向上的聚焦效果得到了明显改善。

1.4 基于SAR图像处理的干扰方法

随着SAR成像技术不断进步，高分辨率SAR图像数据得到迅猛积累。SAR对目标的识别往往基于SAR特征提取和目标分类两个环节，例如，2020年王强等[30]基于目标特征设计了密集连接型残差网络，用于SAR图像目标识别领域。相应地，基于SAR图像处理的干扰方法将SAR图像视为单通道灰度图像，然后将其迁移到光学图像处理领域，之后逐个像素地在图像上添加扰动，以此来生成对抗样本，这大大增加了SAR进行目标识别的难度。2023年一些学者还提出了基于属性散射中心模型引导的对抗攻击算法[31]。此外，针对SAR图像处理的干扰方法也开始向着信号处理领域发展，在2021年，Wang等[32]发现基于生成对抗网络的对抗样本生成算法AdvGAN在SAR图像中同样具备攻击效果。同年，Li等[33]采用FGSM和BIM这两种白盒攻击算法生成了SAR图像对抗样本，然后评估了几种基于CNN的分类模型的成功率，发现影响所生成的对抗样本的关键因素是原始SAR图像的特征空间分布。周隽凡等[34]从幅度稀疏、特征稀疏以及参数稀疏3个统计层面分析了SAR图像稀疏性的表现，并通过仿真验证了现有方法的有效性。2022年，Peng等[35]从SAR图像特性出发，提出了相干斑变化攻击算法，通过连续地重建生成不同分布的相干斑，并使用目标区域提取器来限制扰动的区域，以此保证真实场景中，加性对抗扰动在物理上的可实现性。同年，Xia等[36]基于UAP算法生成通用对抗样本，然后结合SAR二维余弦调相干扰和距离多普勒成像算法，构建无约束最小化模型并利用Adam算法[37]来迭代求解最优的调相序列。

2 SAR-GMTI干扰技术发展

SAR-GMTI技术不仅能够实现高分辨成像，还能同时有效地识别并追踪地面动态目标，SAR-GMTI解决了传统SAR无法监控动目标的问题，严重威胁到了高价值战略目标在战场上的生存能力[38-41]。因此，针对SAR-GMTI进行有效干扰已成为当前SAR干扰研究领域的热点和难点问题[42-49]。2011年，刘阳等[50]采取分数阶傅里叶变换和慢速虚假运动目标这两类技术，对微动目标的相频特性进行了研究，并生成了微动特性干扰信号，对SAR-GMTI系统的方位向产生了影响。2012年，吴晓芳等[51]针对SAR-GMTI系统提出了匀加速运动假目标调制干扰，所产生的干扰信号与SAR信号之间具有较高的相参性，实现了对SAR-GMTI的有效干扰。但是之前对SAR-GMTI干扰技术的探讨主要集中于分析单个点或多个点组成的面，并未充分发挥图像之间的关联性，且对图像中的每一个点都进行调制然后合成虚假图像的方法也耗费大量计算资源。针对这一问题，2013年，林晓烘等[52]研究分析了SAR图像中静态目标和动态目标之间的关联性，从而提出了一种快速产生虚假运动目标信号回波的干扰方法，不仅大大降低了运算量，还实现了对静止场景和运动目标的同时覆盖。

2.1 对SAR-GMTI复合干扰

单一的干扰样式对SAR-GMTI的干扰效果不明显，因此一些学者提出了将多种干扰样式复合形成一种新干扰样式的思路。2010—2012年，吴晓芳等[53-54]陆续提出了3种针对SAR-GMTI工作模式的运动调制干扰方法。2016年，房明星等[55-56]分别采用余弦调相技术和匀加速运动调制技术，针对SAR-GMTI产生了具有二维欺骗和遮蔽效果的两种干扰方法。2017年，毕大平等[57]运用移动干扰站进行了转发式干扰，进而扩展了干扰信号在方位向上的范围，接着借助方位向上的相干噪声调频在距离向实现了扩展，该方法可以在SAR图

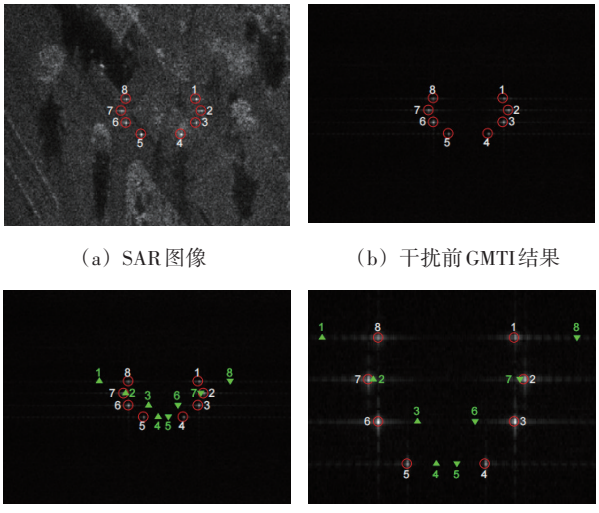
像中生成可控的干扰条带,不仅能掩盖地面静止目标,还能保护运动目标。

2.2　对SAR-GMTI间歇采样干扰

通过对截获的SAR信号进行间歇采样可以产生假目标串,有效地干扰SAR-GMTI系统。2015—2018年,周阳等[58-60]将间歇采样与方位向余弦调相结合实现了对SAR-GMTI系统的二维网状干扰效果,然后运用方位向上运动调制效应的展宽和距离向上间歇采样技术实现了对SAR-GMTI的遮蔽干扰效果。2017年,张云鹏等[61-62]分别进行了慢时间域间歇采样和二维间歇采样,并在慢时间域采取延时转发来实现对假目标位置的控制,从而实现了对SAR-GMTI的有效干扰。但是,由于间歇采样所产生的虚假目标存在较强的规则性和一致性,如它们拥有规律性的幅度变化特性且等间距分布,极易被敌方识别。为了解决这一问题,张静克等[63]在2021年通过调整间歇采样转发干扰的距离向间歇采样周期和占空比,在SAR图像的距离向上形成了在非等间隔分布的干扰条带。2022年,孙光等[64]针对SAR-GMTI这一工作模式采用了间歇采样和噪声乘积调制相结合的干扰方法,通过离线设计欺骗模板产生多种类型的虚假目标,有效弥补了单一间歇采样干扰产生的假目标过于明显而被雷达方识别的问题,使得干扰效果灵活多变。

2.3　对SAR-GMTI协同干扰

在干扰SAR-GMTI系统时,单部干扰机所掩护的范围、在一定时间内能够选择的干扰样式和干扰策略有限,因此基于多干扰机的干扰策略被提出,通过巧妙利用多个不同干扰样式进行组合,可以得到更显著的干扰效果。2016—2017年,张静克等[65-66]利用两部干扰机进行欺骗干扰信号调制,生成了针对SAR-GMTI的虚假运动目标,且该目标的位置和速度均可灵活控制。这种方法虽然提升了虚假运动目标在SAR图像上的逼真程度,但是计算复杂度较高。2019年,孙清洋等[67]针对多通道SAR-GMTI构建了多机协同欺骗干扰模型,该模型的建立降低了计算干扰信号调制系数的难度,降低了干扰的计算复杂度,大大增加了工程上的可实现性。2022年,邢懿鹏[68]在理论分析单部和多部干扰机的调制参数如补偿参考斜距、SAR平台飞行速度、干涉基线等参数的偏差对SAR-GMTI欺骗干扰效果的影响后,构建了以目标识别率、运动信息准确率和位置信息准确率三者为指标的干扰评估模型,该模型能够适用于各种场景,有利于定量分析对SAR-GMTI的干扰效果。同年,刘业民等[69]提出了一种基于双干扰机协同的有源欺骗干扰方法,该方法不仅揭示了虚假的动目标与真实目标的本质区别,还基于此差别给出了对SAR-GMTI/InSAR实施干扰的统一步骤。基于双干扰机协同生成的干扰效果如图4所示。



（a）SAR图像　（b）干扰前GMTI结果

（c）干扰后GMTI结果　（d）干扰后GMTI结果（局部放大）

图4　基于双干扰机协同生成的虚假运动目标

3　SAR干扰技术的发展趋势

虽然现已存在大量的SAR干扰方法,但随着SAR技术的不断发展和应用,SAR干扰技术也相应地呈现出以下发展趋势:

1）当前针对SAR和SAR-GMTI存在很多有源干扰方法,但这些方法的实现往往需要预先获取干扰机到SAR平台的距离、SAR平台的运动轨迹、干扰机到SAR的俯仰角等侦察参数。因此,如何高精度地获取这些侦察参数,提高已有干扰技术在工程上的实用性将是下一步需要重点研究的问题。

2）随着雷达方从单一雷达向雷达组网发展，单干扰机的干扰能力明显不足，而采用多部干扰机进行协同干扰不仅可以有效扩大干扰方保护目标区域的范围，还可以使得干扰策略的选择更多元化，进而形成“多对多”的对抗局面。因此，从时域、频域、空域、能量域和极化域等多个维度出发，如何实现多部干扰机之间的组网协同，必将是SAR干扰的一大发展方向。

3）时代的发展带来了各种各样的实际应用需求，由此不同种类的SAR工作模式应运而生，除SAR和SAR-GMTI这两种工作模式外，还有ISAR、InSAR、线阵SAR、曲线SAR、圆周SAR和极化SAR等不同工作模式。现实中SAR系统往往具备多种工作模式，具有较强的抗干扰能力。因此，现有SAR干扰技术逐渐无法满足同时干扰多种SAR工作模式的需求。对干扰方而言，有必要开展同时针对多种不同SAR工作模式的通用干扰方法和手段研究，达到能灵活地对不同波形、不同工作模式的SAR进行反制的目的。

4）随着现代战争向信息化、智能化发展，未来的SAR干扰技术也将会逐渐结合深度学习、机器学习、神经网络等智能化算法，通过使用这些人工智能手段实现对干扰时机、干扰样式、干扰策略等干扰参数的最优选择，以最大化干扰效能。

4 结束语

当前国际军事形势发生了复杂的变化，各国之间的矛盾与冲突越来越剧烈，受这种国际形势的影响，需研究新的SAR干扰技术以增强我国的领土防御能力。本文基于近几年SAR干扰技术的发展，并结合之前几十年的研究对SAR干扰技术的发展做了综述，介绍了SAR干扰和SAR-GMTI干扰这两种干扰技术的发展情况，并结合自己的经验与感悟指出了其发展趋势，希望能为SAR干扰这一领域的后续研究提供一定的参考。

参考文献：

[1] CUMMING I G,WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Boston: Artech House, 2005.

[2] ENTZMINGER J N, FOWLER C A, KENNEALLY W J. JointSTARS and GMTI: Past, Present and Future [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2):748-761.

[3] 张永顺，童宁宁，赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 北京:国防工业出版社，2006.

[4] GOJ W W. Synthetic-Aperture Radar and Electronic Warfare [M]. Boston: Artech House, 1993.

[5] CONDLEY C J. Some System Considerations for Electronic Countermeasures to Synthetic Aperture Radar[C]// IEE Colloquium on Electronic Warfare Systems, London, UK: IET,1991:1-12.

[6] 梁百川. 对合成孔径雷达的干扰[J]. 上海航天，1995，12(1):37-42.

[7] 陈宁，张杰儒. 合成孔径雷达干扰技术研究[J]. 航天电子对抗，1997，13(4):45-48.

[8] EKESTORM S R T, KAROW C. An All-Digital Image Synthesizer for Countering High-Resolution Radars [D]. USA: Naval Postgraduate School, 2000.

[9] 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.

[10] 李江源，王建国，杨建宇. 基于数字储频式的对SAR类杂波干扰[J]. 电子科技大学学报，2005，34(6):739-742.

[11] 李江源. 高分辨SAR干扰机理与高效干扰方法研究[D]. 成都:电子科技大学，2007.

[12] 张锡祥. 干扰合成孔径雷达的统一方程[J]. 中国电子科学研究院学报，2006，1(2):107-113.

[13] 吴晓芳，柏仲干，代大海，等. 对SAR的方位向间歇采样转发干扰[J]. 信号处理，2010，26(1):1-6.

[14] LV B. Simulation Study of Noise Convolution Jamming Countering to SAR [C]// Proceedings of International Conference on Computer Design and Applications, Qinhuangdao, China: IEEE, 2010:130-133.

[15] YE Wei, RUAN Hang, ZHANG Shuxian, et al. Study of Noise Jamming Based on Convolution Modulation to SAR [C]//Proceedings of International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun,China:IEEE, 2010:169-172.

[16] 王盛利，于立，倪晋鳞，等. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究[J]. 电子学报，2003，31(12):1900-1902.

[17] 孙光才，周峰，邢孟道，等. 虚假场景SAR欺骗式干扰技术及实时性分析[J]. 西安电子科技大学学报，2009，36(5):813-818.

[18] 刘庆富. 对SAR/InSAR侦察与干扰方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学，2013.

[19] CHANG Xin ，DONG Chunxi, TANG Zhengzhao, et al.

Mosaic Scene Deception Jamming Based on 2D Separation Modulation Against SAR [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(2):310-315.

[20] 戴长俊.合成孔径雷达高效回波与干扰模拟方法[D].成都:电子科技大学,2022.

[21] 纪朋徽,邢世其,代大海,等.SAR距离卷积方位乘积调制场景欺骗干扰方法[J].航空学报,2023,44(18):242-259.

[22] XU Letao, FENG Dejun, LIU Yongcai, et al. A Three-Stage Active Cancellation Method Against Synthetic Aperture Radar[J].IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11):6173-6178.

[23] 徐乐涛,冯德军,王雪松.基于间歇采样的合成孔径雷达目标有源隐身方法[J].电波科学学报,2016,31(1):31-38.

[24] WU Qihua , LIU Jin , WANG Junjie, et al. Improved Active Echo Cancellation Against Synthetic Aperture Radar Based on Nonperiodic Interrupted Sampling Modulation [J].IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11):4453-4461.

[25] 周其阵.基于干扰痕迹优化的合成孔径雷达欺骗干扰研究[D].南昌:南昌大学,2023.

[26] ZHAO Bo, ZHOU Feng, BAO Zheng. Deception Jamming for Squint SAR Based on Multiple Receivers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8):3988-3998.

[27] ZHAO Bo, HUANG Lei, ZHOU Feng, et al. Performance Improvement of Deception Jamming Against SAR Based on Minimum Condition Number[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, 10(3):1039-1055.

[28] ZHOU Feng, TIAN Tian, ZHAO Bo, et al. Deception Against Near-Field Synthetic Aperture Radar Using Networked Jammers[J].IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6):3365-3377.

[29] 李永祯,刘业民,邢世其,等.基于多接收机协同的无源测向及SAR欺骗干扰方法研究[J].系统工程与电子技术,2023,45(12):3792-3805.

[30] 王强,曹磊,史润佳,等.基于DCResNet的SAR图像车辆目标识别[J].雷达科学与技术,2021,19(4):387-392.

[31] QIN Weibuo, LONG Bo, WANG Feng. SCMA: a Scattering Center Model Attack on CNN-SAR Target Recognition[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023,20:1-5.

[32] WANG Mian, WANG Hongqiao, WANG Ling. Adversarial Examples Generation and Attack on SAR Image Classification[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Innovation in Artificial Intelligence, Xiamen, China:[s.n.], 2021:87-91.

[33] LI Haifeng, HUANG Haikuo, CHEN Li, et al. Adversarial Examples for CNN-Based SAR Image Classification: an Experience Study[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021,14:1333-1347.

[34] 周隽凡,孙浩,雷琳,等.SAR图像稀疏对抗攻击[J].信号处理,2021,37(9):1633-1643.

[35] PENG Bowen, PENG Bo, ZHOU Jie, et al. Speckle-Variant Attack: Toward Transferable Adversarial Attack to SAR Target Recognition[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022,19:1-5.

[36] XIA Weijie, LIU Zhe, LI Yi. SAR-PeGA: a Generation Method of Adversarial Examples for SAR Image Target Recognition Network[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2023,59(2):1910-1920.

[37] KINGMA D P, BA J L. Adam: A Method for Stochastic Optimization[C]//3rd International Conference on Learning Representations, San Diego, CA, USA:[s.n.],2014:1-13.

[38] 张云鹏,毕大平,房明星,等.多通道SAR及其干扰技术研究现状[J].电光与控制,2017,24(11):58-63.

[39] 黄大通,邢世其,庞磷,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.

[40] 吴晓芳.SAR-GMTI运动调制干扰技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.

[41] LI Xiang, DENG Bin, QIN Yuliang, et al. The Influence of Target Micromotion on SAR and GMTI [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7):2738-2751.

[42] YANG Kaizhi, MA Fangfang, RAN Da, et al. Fast Generation of Deceptive Jamming Signal Against Spaceborne SAR Based on Spatial Frequency Domain Interpolation [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60:1-15.

[43] YANG Kaizhi, YE Wei, WU Xu, et al. Fast Generation of Deceptive Jamming Signal Against Space Borne SAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13:5580-5596.

[44] LI Yuntao, PANG Hongfeng, LI Lei, et al. Research on Rebound Jamming Against Multi-Input Multi-Output Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Access, 2020, 8:

100791-100801.

[45] RAN Jinhe, LI Xiuhe, SHEN Yang, et al. A Jamming Method Against Bistatic SAR Based on Modulation Theory[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019,30(3):504-510.

[46] SAEEDI J. A New Hybrid Method for Synthetic Aperture Radar Deceptive Jamming[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies,2019,4(1):1-14.

[47] JI Penghui, DAI Dahai, XING Shiqi, et al. A New Three-Dimension Deceptive Scene Generation Against Single Pass Multi Baseline InSAR Based on Multiple Transponders[J]. Sensors,2020,20(4):1-15.

[48] 刘庆富.对SAR/InSAR侦察与干扰方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013.

[49] SUN Qingyang, SHU Ting, YU Kaibo, et al. A Novel Deceptive Jamming Method Against Two-Channel SAR-GMTI Based on Two Jammers [J]. IEEE Sensors Journal,2019,19(14):5600-5610.

[50] 刘阳,王雪松.微动特性干扰对基于FrFT的多孔径SAR/GMTI的效果分析[J].电子学报,2011,39(9):2039-2045.

[51] 吴晓芳,梁景修,王雪松,等.SAR-GMTI匀加速运动假目标有源调制干扰方法[J].宇航学报,2012,33(6):761-768.

[52] 林晓烘,薛国义,刘培国.SAR-GMTI匀速运动虚假场景干扰信号快速生成方法[J].国防科技大学学报,2013,35(6):82-87.

[53] 吴晓芳,代大海,王雪松,等.基于微动调制的SAR新型有源干扰方法[J].电子学报,2010,38(4):954-959.

[54] 吴晓芳,王雪松,梁景修.SAR-GMTI高逼真匀速运动假目标调制干扰方法[J].宇航学报,2012,33(10):1472-1479.

[55] 房明星,毕大平,沈爱国.基于旋转天线的SAR-GMTI二维余弦调相转发干扰[J].电子与信息学报,2016,38(7):1765-1772.

[56] 周阳,毕大平,房明星,等.对SAR-GMTI的灵巧遮蔽干扰方法研究[J].现代雷达,2016,38(9):79-85.

[57] 毕大平,房明星,杨永晶.基于运动干扰站的SAR-GMTI相干噪声调频干扰[J].现代雷达,2017,39(10):87-94.

[58] 周阳,毕大平,沈爱国,等.微动调制间歇采样转发干扰对SAR-GMTI干扰性能分析[J].电光与控制,2017,24(7):12-16.

[59] 周阳,毕大平,沈爱国,等.基于运动调制的SAR-GMTI间歇采样遮蔽干扰方法[J]. 雷达学报,2017,6(4):359-367.

[60] 周阳,毕大平,沈爱国.基于运动调制的SAR-GMTI余弦调相间歇采样假目标干扰[J].弹箭与制导学报,2018,38(2):150-154.

[61] 张云鹏,毕大平,周阳,等.对抗SAR-GMTI的方位向间歇采样延时转发干扰方法[J].探测与控制学报,2017,39(5):84-90.

[62] 张云鹏,毕大平,房明星,等.多通道SAR-GMTI二维间歇采样延时转发干扰[J].系统工程与电子技术,2017,39(11):2448-2455.

[63] 张静克,汪亚,戚宗锋,等.对SAR-GMTI复杂间歇采样转发干扰[J].航天电子对抗,2021,37(4):29-33.

[64] 孙光,邢世其,黄大通,等.基于噪声乘积调制的SAR-GMTI间歇采样干扰方法[J].系统工程与电子技术,2022,44(10):3059-3071.

[65] 张静克.对多通道SAR分布式协同干扰技术研究[D].长沙:国防科技大学,2016.

[66] ZHANG Jingke, DAI Dahai, QI Zongfeng, et al. Analysis of Deceptive Moving Target Generated by Single Jammer in Multi-Channel SAR-GMTI[C]// International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Suzhou, China: IEEE, 2017:1-2.

[67] 孙清洋.SAR-GMTI高逼真有源欺骗干扰方法研究[D].上海:上海交通大学,2019.

[68] 邢懿鹏.多通道SAR-GMTI干扰质量评估方法及欺骗干扰仿真软件设计[D].杭州:杭州电子科技大学,2022.

[69] 刘业民,袁露,周瑜,等.基于双干扰机协同的SAR-GMTI/InSAR有源欺骗干扰方法[J].航天电子对抗,2022,38(3):27-34.

作者简介:

胡泽宾 男,博士,高级工程师,主要研究方向为电子侦察与对抗系统。