

合成孔径雷达干扰技术研究综述

李永祯* 黄大通* 邢世其 王雪松

(国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室 长沙 410073)

摘 要: 合成孔径雷达(SAR)是一种全天候、全天时、具备高分辨率的成像设备,被广泛应用于对敌侦察,为战场决策提供及时可靠的情报支持。如何压制和扰乱SAR设备的成像侦察,实现对高价值目标和要地的有效防护,已成为当前电子对抗领域的研究热难点之一。该文探讨了SAR干扰的技术进展和发展趋势,首先详细梳理了SAR干扰技术的发展脉络,然后结合仿真实验对比分析了典型SAR干扰样式的优缺点,最后总结了现有SAR干扰技术存在的不足,并指出其未来发展趋势,可为专家学者提供一定的参考。

关键词: 合成孔径雷达; 电子对抗; 干扰样式; 发展历程; 未来趋势

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)05-0753-12

DOI: 10.12000/JR20087

引用格式: 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.

Reference format: LI Yongzhen, HUANG Datong, XING Shiqi, *et al.* A review of synthetic aperture radar jamming technique[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(5): 753-764. doi: 10.12000/JR20087.

A Review of Synthetic Aperture Radar Jamming Technique

LI Yongzhen* HUANG Datong* XING Shiqi WANG Xuesong

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) is an all-weather and all-time imaging radar with high resolution, which is widely used for enemy reconnaissance to provide timely and accurate intelligence for taking decisions during wars. It has become a hot issue in the contemporary electronic warfare to suppress and disorder the reconnaissance imaging of SAR equipment for protecting high-value targets and important strategic areas. This study discusses the development and future trend of SAR jamming techniques. First, the history of development of SAR jamming techniques is discussed and explained in detail. Then, the advantages and disadvantages of the typical SAR jamming models are comparatively analyzed together with simulation experiments. Finally, the current defects of the SAR jamming techniques are summarized and the future trend of the SAR jamming techniques is also pointed out, providing some reference for experts and scholars.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Electronic warfare; Jamming model; Development history; Future trend

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,

收稿日期: 2020-06-30; 改回日期: 2020-09-12; 网络出版: 2020-09-27

*通信作者: 李永祯 e0061@sina.com; 黄大通 huangdatong68@163.com

*Corresponding Author: LI Yongzhen, e0061@sina.com; HUANG Datong, huangdatong68@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61971429, 61901499)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971429, 61901499)

责任编辑: 周峰 Corresponding Editor: ZHOU Feng

SAR)是一种先进的微波成像设备^[1],能获得类似光学照片的目标图像,具备全天时、全天候、处理增益高、反干扰能力强等众多优点,是战略情报侦察和战场侦察的重要手段。在爆发的科索沃战争、阿富汗战争、伊拉克战争和利比亚战争等高技术局部战争中SAR发挥了显著作用,已日益成为信息战场中获取对方重要情报的关键节点。随着SAR成像技术的快速发展,其军事应用呈现出“侦察打击一体化”、“动静目标兼顾化”、“平时战时结合化”等新特点、新趋势,不仅具有对地面静止目标的高

分辨成像侦察能力,而且具备对地面运动目标的指示能力^[2],如图1所示,以及实现目标干涉三维成像的能力^[3]。

目前,世界各军事强国均大力发展以SAR为关键传感器的情报侦察、火力引导和“察打一体”系统,其中已发展的代表性情报侦察系统包括美国“长曲棍球”SAR成像卫星、“全球鹰”无人侦察机、日本PALSAR成像卫星和德国TerraSAR成像卫星等,有代表性的“察打一体”系统包括美国的F-16, F-22, F-35战斗机,“捕食者”系列无人机,印度的光辉战斗机等。这些系统大都具备多普勒束锐化(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。不同成像模式服务于不同作战需求, DBS和条带SAR模式成像分辨率较低,一般用于大范围目标搜索;聚束SAR成像分辨率高,主要用于小范围感兴趣目标区域详查;而GMTI模式则用于捕获成像区域内运动目标。这些系统不仅能够全天时、全天候进行区域侦察,使得对方武器装备的部署、机动、日常训练面临极大的暴露风险,而且有人/无人机组“察打一体”系统还具备在复杂地形和恶劣气象条件下对战场地面目标实施快速、精确打击的能力,使得高价值目标战时面临着严重的生存威胁。因此, SAR干扰技术的研究一直备受世界军事强国的大力支持和长期投入,相关科研机构与院校也不断研发出新的SAR干扰技术和系统,以适应未来战争的需求。

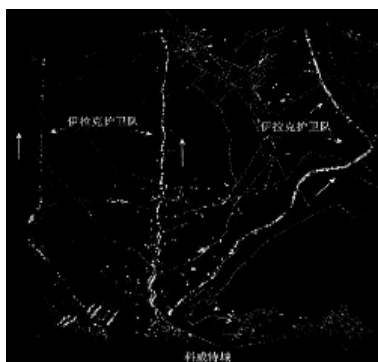
本文第2节总结梳理了国内外相关研究机构和院校在SAR干扰技术领域的研究进展;第3节结合仿真实验,对比分析了典型SAR干扰技术的干扰效果及优缺点;第4节归纳了现有SAR干扰技术中存在的不足,进而指出其未来发展趋势,为该领域今后的研究课题提供一定参考。

2 SAR干扰技术的发展脉络

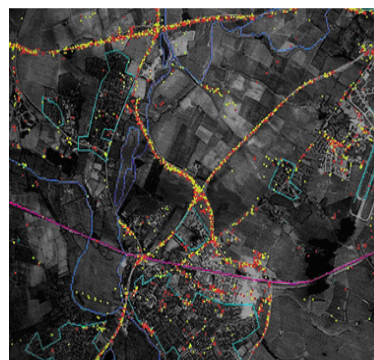
为抢夺信息“高地”,世界各国不断研发出新的电子干扰技术和系统。然而,一旦某种干扰技术被公开或被使用,在以后的作战中可能不再奏效或难以达到理想效果,故公开发表的文献资料较为有限。尽管如此,强烈的军事需求始终推动着国内外众多科研单位与院所对SAR干扰的理论和进行着发展与完善。其中,代表性的国外研究机构有美国海军研究生院、英国国防部海军研究所、挪威国防研究院、伊斯坦布尔科技大学以及埃及军事工程学院等;而国内在该领域的研究比较活跃,较为突出的单位主要有中国电子科技集团、航天科工集团、国防科技大学、火箭军工程大学(原第二炮兵工程大学)、航天工程大学(原中国人民解放军装备学院)、西安电子科技大学、原中国科学院电子学研究所、电子科技大学等。纵观SAR干扰技术的发展历程,至今可将其大致划分为如下3个阶段。

2.1 SAR干扰技术的序幕阶段

20世纪末的后10年拉开了SAR干扰技术的序幕,重点以星载SAR作为攻击对象,以噪声干扰作为研究重点。从公开文献来看,美国学者Goj^[4]于1989年在《Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare》一书中首次提到了对SAR的噪声干扰技术,分析了特定空间位置处干扰机的干扰性能,定义了等功率密度线的概念。1990年,英国学者Condley^[5]根据干扰机接收灵敏度和发射功率等参数,对噪声干扰的可行性等几个关键系统问题作了理论分析,并给出了对SAR的干扰效果仿真。1995年,西安电子科技大学的梁百川等人^[6]分析了SAR实施阻塞式干扰、瞄准式干扰和随机脉冲干扰的可能性。1997年,英国Dumper等人^[7]给出了SAR干扰方程,阐述了平均发射功率、干扰机有效



(a) 伊拉克撤军图
(a) The retreat figure of Iraq army



(b) SAR-GMTI叠加图
(b) The superposition figure of SAR-GMTI

图1 典型SAR-GMTI观测结果

Fig. 1 The typical SAR-GMTI observation results

辐射功率、成像几何场景以及雷达系统参数等对干扰效果的影响。同年,中国电子科技集团第29研究所^[8]采用等功率密度线,讨论了噪声干扰有效辐射功率和SAR成像区域的关系,并研制出了某型大功率噪声压制干扰机。

2.2 SAR干扰技术的蓬勃发展阶段

第2阶段是2000—2010年,该阶段的干扰对象仍以星载SAR为主,同时兼顾了机载SAR成像系统,工作模式为常规条带模式,以欺骗或灵巧压制干扰作为研究重点,涌现出了大量的新型干扰样式,极大丰富了SAR干扰的理论方法,提升了干扰效能。2000年,美国海军研究院^[9]提出了由数字射频存储器、数字延迟线、幅度和频率调制器等辅助电路组成的数字图像合成(Digital Image Synthesizer, DIS)干扰技术:根据设定的虚假目标参数,对截获信号调制相应相位和幅度,形成欺骗信号,继而在图像中产生舰船等虚假目标。可以说,DIS干扰技术的提出为后来深入研究SAR欺骗干扰具有很好启发和借鉴作用。2002年,原中国科学院电子学研究所的胡东辉等人^[10]提出了散射波干扰的概念,阐述了其干扰机理,为SAR干扰技术研究提供了新思路。2003年,南京电子技术研究所的王盛利等人^[11]根据SAR目标回波模型,提出了基于卷积调制的欺骗干扰原理,并给出了其频域实现的方法,后来的欺骗干扰都不同程度地借鉴了其思想。2005年,电子科技大学的李江源等人^[12]提出了类杂波干扰样式,指出其能从时域和频域对回波作多维有效覆盖^[13]。2006年,国防科技大学的李伟等人^[14]提出了基于卷积调制的欺骗式动目标干扰方法,但文中缺乏在GMTI处理下的干扰效果验证。国防科技大学的黄洪旭等人^[15-17]根据线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号的时频耦合特性,提出了3种移频调制干扰样式,实现了对SAR的点、线、面的干扰效果。针对欺骗干扰计算量大的问题,2006年电子科技大学的甘荣兵等人^[18]将线性累加转换为矩阵乘积,提高了运算效率。同年,张锡祥院士^[19]推导出了常规脉冲雷达干扰与SAR干扰的统一干扰方程。2009年,国防科技大学的吴晓芳等人^[20]把间歇采样转发干扰技术^[21]应用到SAR干扰上,成功产生了距离向等间距假目标串。同年,吴晓芳^[22]还在分析了固定移频干扰、随机移频干扰和步进移频干扰等多种移频干扰样式的基础上,归纳总结出了分段移频调制干扰的统一形式。国防科技大学电子对抗学院(原电子工程学院)的沈爱国等人^[23]研究了随机脉冲串卷积和相同噪声样本卷积的SAR干扰效果。2010年,国防科技大学的吴晓芳等人^[24]利用SAR回

波的方位向时频耦合特性,提出了多普勒调制干扰。此外,吴晓芳等人^[25]进一步将间歇性采样技术拓展到了慢时间上,产生了方位向等间距假目标串。同年,军械工程学院的Lv^[26]和航天工程大学的Ye等人^[27]则提出了在慢时间上采用随机噪声样本卷积的SAR干扰方法,产生了距离向范围可控的压制条带。

2.3 SAR干扰技术的博弈对抗阶段

第3阶段是2010年至今,各类新体制SAR系统的不断涌现使其性能得到了很大提升,并由此针对不同的干扰样式发展出了相应的抗干扰技术,具备了特定的反干扰能力。与之相呼应,为有效对抗各类新体制SAR,相关科研单位和院所在上一阶段的研究基础上投入了大量精力,研究出了相应的干扰样式和方法。

(1) 在常规SAR干扰方面,随着SAR系统分辨率和信息处理能力的不断提升,原来单一、简单的干扰样式易被辨识和滤除,因此此时的SAR干扰研究重点是如何对基本干扰样式进行优化组合和对SAR的场景欺骗。电子科技大学的王文钦等人^[28,29]将频控阵技术应用于干扰机设计,并验证了该体制下的微动干扰和散射波干扰效果。国防科技大学的陈思伟等人^[30]、国防科技大学电子对抗学院的房明星等人^[31]、西安电子科技大学的董春曦等人^[32]、航天工程大学的贾鑫等人^[33,34]、火箭军工程大学的朱守保等人^[35-37]则基于间歇采样干扰、余弦调相干扰、散射波干扰以及移频调制干扰等提出了多种复合干扰方法,有效地弥补了单一干扰样式的缺陷,达到了更优的干扰效果。在场景欺骗干扰方面,主要工作则放在了降低算法计算量,提高干扰实时性和虚假目标逼真度上。国防科技大学的林晓烘等人^[38]以分辨率为代价提出了基于逆RD欺骗算法;国防科技大学的刘永才等人^[39-41]以满足雷达斜视角为目的提出了基于逆W-K的欺骗算法和频域三阶段欺骗算法,并兼顾了假目标的聚焦性;西安电子科技大学的孙光才^[42]和赵博等人^[43]通过拆分干扰机频域响应,将实时累加转化为了线下模板预生成和对截获信号的实时卷积。西安电子科技大学的畅鑫^[44]、上海交通大学的Sun等人^[45]以及航天工程大学的Yang^[46]则将欺骗模板分割为多个小场景模板,对其作并行时延和移频调制处理。此外,国防科技大学的刘庆富^[47]还提出了时频交叉乘积的欺骗算法,通过对截获信号作时域乘积调制,直接避免了对干扰机频域响应的计算。在提高欺骗的真实性上,西安电子科技大学的周峰等人^[48-50]采用多接收机协同定位,直接获取斜距差,避免了泰勒展开造成的误差积累。上海交通大学的Sun等人^[51]采用计算机软

件模拟不同场景的目标散射特性,提高了虚假目标和场景的适应性;电子科技大学的马德娇等人^[52]通过消除真实目标的阴影特征,使场景中的真假目标无法辨识。电子科技大学的赵明明^[53]通过提取模板库的目标特征,改变了场景中真实目标的SAR图像形状和散射特性。此外,航天工程大学的卢庆林等人^[54]和西安电子科技大学的Fan等人^[55]还提出了采用生成对抗网络产生高逼真虚假模板的方法。

(2) 在波形捷变SAR干扰方面,波形捷变使干扰信号与SAR回波间不再相干而达到了抑制干扰的目的。鉴于此,国防科技大学的杨伟宏等人^[56-58]充分利用了间歇采样技术能实现对当前脉冲内截获信号的同时转发,将其分别与快/慢时间调制、散射波干扰以及运动干扰机相复合,为有效对抗波形捷变SAR提供了一种全新的途径。此后,国防科技大学的张静克等人^[59,60]在研究了欠采样对调频斜率极性捷变SAR干扰效果的基础上,将其与散射波干扰相复合。国防科技大学的刘立新等人^[61]则将时频交叉乘积与间歇采样相结合,实现了尺寸和形状均可灵活控制的分布式虚假目标欺骗。

(3) 在多通道SAR-GMTI干扰方面,GMTI处理不仅可以实现对干扰信号的部分对消,还能破坏虚假目标的重定位效果,降低干扰效能。鉴于此,国防科技大学的吴晓芳等人^[62-64]将运动目标成像特性用于干扰,提出了高逼真匀(加)速运动调制和微动调制干扰技术,实现了对多通道SAR-GMTI的高效动目标欺骗干扰。国防科技大学的张静克等人^[65]分析了单干扰机的动目标欺骗效果,指出GMTI处理会对假目标的速度估计和重定位发生偏差。针对该问题,上海交通大学的Sun等人^[66,67]采用双干扰机协同调幅的方法,控制了虚假目标相位,以抵消单干扰机产生的附加相位,使其重定位于预定位置。鉴于噪声干扰的GMTI输出受正弦调制影响,西安电子科技大学的畅鑫等人^[68]通过设置干扰机的方位向间距实现了对GMTI输出的全平面压制。同样,为达到更理想和丰富的干扰效果,国防科技大学电子对抗学院的毕大平等人^[69-74]、国防科技大学的刘业民^[75,76]、航天工程大学的降佳伟等人^[77]将匀(加)速运动调制和微动调制与移频调制、间歇性采样、卷积调制以及散射波干扰等相组合,提出了多种SAR-GMTI复合干扰方法。

(4) 在InSAR干扰方面,由于该体制具备了目标和场景的高程反演能力,因此可鉴别只具备二维干扰效果的干扰样式。鉴于此,国防科技大学的张静克等人^[78]分析了微动干扰对InSAR的干扰效果,表明其能够在InSAR图像中形成沿方位向分布

的形似“连续的栅栏”或“离散的栅栏”的多假目标。国防科技大学的刘庆富^[47]则在研究了单天线干扰存在“斜坡”效应的基础上,提出了基于双天线幅相控制的干扰方法,提高了干扰所形成的虚假地形的逼真度。西安电子科技大学的黄龙等人^[79]通过协同调制双(多)干扰机产生的虚假目标时延和补偿相位,实现了二维图像和数字高程欺骗。北京航空航天大学Wu等人^[80]则提出了通过双干扰机协同布站和调制附加相位的方法,实现虚假目标高度欺骗。而在对抗双通道干扰对消技术方面,北京科技大学的唐波^[81]推导了干扰机运动与双通道对消时图像恶化程度之间的关系。在此基础上,西安电子科技大学的黄龙等人^[82,83]采用分布式多天线分时发射模拟旋转干扰机和双干扰机同时工作的方法,破坏了雷达对干扰相位差的估计,达到了对抗干扰对消的目的。国防科技大学电子对抗学院的张云鹏等人^[84,85]采用慢时间域间歇性采样和余弦调相的方法来扰乱成像雷达对消后的真实场景。

3 典型的SAR干扰样式

鉴于可对地面作高分辨率成像,SAR系统可通过搭载于多种飞行平台(如战略轰炸机、电子战飞机、卫星等),被广泛应用于对敌军事设施和部署的侦察,以及时掌控战场态势,建立军事斗争中的“不对称信息”优势。对此,SAR干扰的主要目的是削弱、破坏或欺骗敌方的成像结果,阻止敌对我敏感区域的监控和对我高价值目标的检测识别,争夺战场主动权。

作为电子战领域^[86]的一个重要分支,SAR干扰技术是在继承了传统雷达干扰技术的基础上作的发展与创新,由最简单的噪声干扰,发展到了如今种类繁多的特色干扰样式,下面重点介绍典型的SAR有源干扰样式的优缺点。其中,典型的噪声干扰样式^[87]有射频噪声干扰、噪声调幅干扰和噪声调频干扰等。典型的欺骗干扰样式有卷积调制欺骗干扰^[88]和时频交叉乘积欺骗干扰^[47]等,如图2(a)所示,欺骗干扰在真实坦克目标附近均产生了高逼真的虚假坦克,可有效迷惑敌SAR侦察系统;间歇性采样转发干扰^[20,25],如图2(b)所示,距离向间歇采样转发干扰在图像的距离向产生了等间距分布的高逼真虚假目标串;移频调制干扰^[15-17],如图2(c)所示,步进移频干扰在图像中产生了一个压制面,可实现对分布式目标和小尺寸设施的掩护;运动调制干扰^[62-64],如图2(d)所示,微动干扰在方位向产生了成对等间隔分布的虚假点目标串;灵巧噪声干扰^[26,27],如图2(e)所示,噪声卷积调制干扰产生了扩散于方位向的压制条带,实现了对该区域场景的覆盖。

此外，从表1的干扰样式对比可见，除噪声干扰外，其余转发干扰样式的调制方法均是基于截获的雷达信号波形，因此干扰信号与雷达信号间具有一定相干性，可获得雷达信号处理增益，降低对干扰功率的需求。然而，没有一种干扰样式是万能的，可达到绝对理想的效果，都有其各自的缺陷与局限性。鉴于此，复合干扰充分利用了各干扰样式的优势，巧妙地将其融合在一起，达到了取其“长”，补己“短”的目的。图2(f)所示为匀加速运动调制与距离向间歇采样相复合的干扰结果，图像中产生了多条超前和滞后的等间距压制线，其密集程度可通过调节采样周期和采样脉冲宽度来改变，相比于单一的匀加速运动调制干扰^[63]，其干扰效果更加显著。

4 SAR干扰技术存在的问题及发展趋势

4.1 SAR干扰技术存在的不足

虽然现已存在大量的SAR干扰方法，但依然存在着以下3方面的问题待专家学者们作进一步研究：

(1) 现有干扰技术多以单通道SAR或双/三通道SAR-GMTI作为攻击目标，干扰对象设想仍较为理想简单。然而，阵列技术的广泛应用(如SAR-DBF, SAR-STAP等)使SAR具备了更高的系统自由度，提高了其反干扰能力，因此有必要展开对先进SAR系统的干扰技术研究。

(2) 极化技术的应用使得SAR能获得更为丰富的目标信息，有利于虚假目标识别，而现有针对极

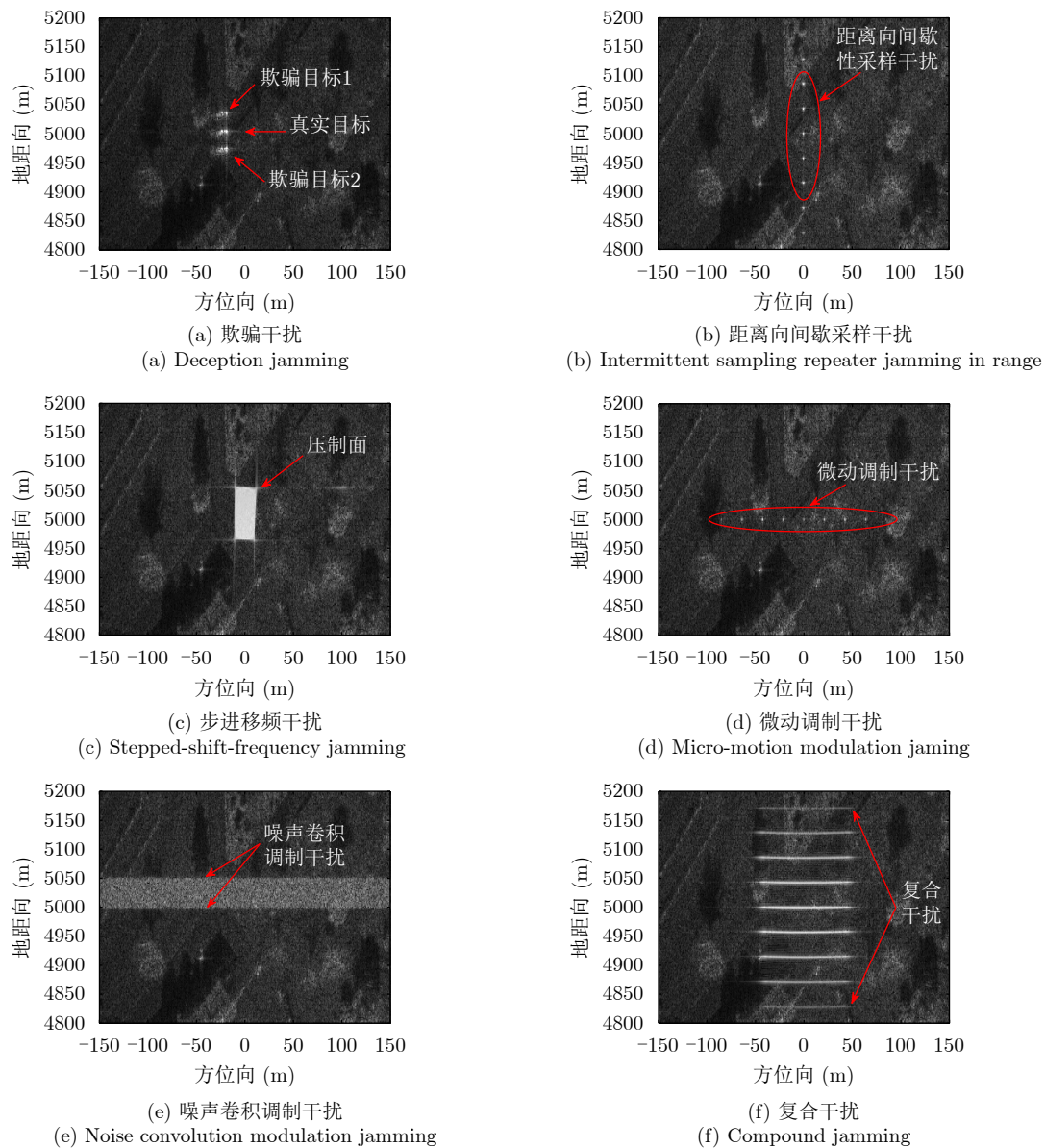


图 2 典型SAR干扰样式

Fig. 2 The typical SAR jamming models

表 1 典型干扰样式对比分析
Tab. 1 The comparison of typical jamming models

干扰样式	干扰效果	所需侦察参数	优点	缺点
噪声干扰	能量压制目标回波, 破坏成像质量	1.信号载频 2.信号带宽	1.侦察参数依赖小 2.应用范围广	功率需求大, 易暴露干扰机位置
卷积式欺骗干扰	虚假目标或场景	1.截获SAR信号 2.平台高度 3.平台速度 4.脉冲重复频率 5.信号波长	可产生高逼真点、面欺骗和场景欺骗	1.算法计算量大, 实时性较差 2.侦察参数依赖性较高
间歇采样转发干扰	距离向或方位向等间距 虚假点目标串	1.截获雷达信号 2.信号时宽	1.侦察参数依赖小, 实时性高 2.假目标数目和间距灵活可变 3.解决了干扰机天线收发隔离问题	1.假目标规律性强, 易被识别 2.干扰时间利用率较低 3.易受占空比影响
散射波干扰	虚假点、面目标欺骗或 场景压制	截获SAR信号	侦察参数依赖小, 执行简单	能量利用率低, 不易进入雷达主瓣
移频干扰	虚假点目标欺骗或 压制条带、压制面	1.截获SAR信号 2.调频斜率 3.信号带宽	可掩护分布式面目标和大场景	侦察参数依赖性较高
运动调制干扰	方位向压制线或等间距 虚假点目标串	1.截获SAR信号 2.信号载频 3.平台速度 4.平台高度	1.压制线的长度可变 2.虚假点目标的间距和数量可变	1.压制面小, 难以掩护面目标 2.假目标规律性太强, 易被识别
灵巧噪声干扰	压制条带、压制面或密集 假目标压制	1.截获SAR信号 2.平台速度 3.信号波长 4.平台高度 5.调频斜率等	1.调制方式灵活 2.干扰效果多样	以压制效果为主, 难以形成面目标和场景欺骗

化SAR欺骗干扰技术的研究尚未深入研究涉及, 如何在研究目标极化散射特性的基础上, 将其应用到电子干扰是一个值得深入思考的问题。

(3) 作为电子对抗中的“矛”与“盾”, 干扰与反干扰始终相互博弈。然而, 现有的SAR干扰技术多数只考虑了简单的系统级反干扰措施(如多通道对消等)。因此, 为深入加强我干扰技术的实战化, 需进一步研究在先进反干扰技术^[89]下的干扰对抗技术, 只有当我干扰技术反制了敌反干扰技术时, 才能扰乱其SAR侦察设备。

4.2 SAR干扰技术的发展趋势

综上所述, 不难发现SAR干扰技术存在着以下5个发展趋势:

(1) 由非相干干扰向相干干扰方向发展。虽然噪声干扰对侦察参数的需求较低, 适应性强, 但对干扰机发射功率的需求很高, 反之相干干扰却能获得部分乃至全部的雷达信号处理增益, 极大降低了干扰设备负担, 对干扰能量的利用率较高, 使用价值更高。

(2) 由小场景欺骗向大场景、高分辨率和实时性欺骗方向发展。SAR系统分辨率不断提高, 观测域更广, 需掩护的己方要地范围更大, 实现对

SAR的大场景、高分辨欺骗, 并兼顾算法计算量, 提高干扰实时性将更加符合未来战场的需求。

(3) 由单一化向多样化、复合化和智能化方向发展。复合干扰可充分利用各干扰样式的优势, 将其作多样化组合, 弥补单一干扰的缺陷, 加强其对抗能力; 此外, 通过建立干扰决策模型, 采用智能学习算法, 选择最优干扰样式和方法, 以最大化干扰效果。

(4) 由场景压制向特征欺骗方向发展。针对压制性干扰已间接显示了敏感区域的问题, 如何灵巧地使用欺骗干扰技术, 巧妙地改变待掩护目标的散射特性与形状, 以此实现“电磁伪装”, 将具有更大的应用潜力。

(5) 由单干扰机向多干扰机协同方向发展。多通道技术的应用使SAR具备了更高的系统自由度, 提高了其反干扰能力。基于此, 多干扰机协同可有效扩大保护区域, 弥补单部干扰机的不足, 使调制方法更加灵活, 形成“多”对“多”的对抗局面。

5 结束语

SAR系统性能的不不断提升, 使其在现代高科技战争中发挥着越来越重要作用, 推动着“察打一体

化”系统的不断优化。受强烈的军事需求和国际电子对抗形势刺激, 研究新一代SAR干扰技术对提高我国土防御能力起到了至关重要的作用。在此背景下, 本文较为详细地阐述了SAR干扰技术的发展历程, 介绍了典型的有源干扰样式, 以便专家学者能快速了解该领域的研究动态。最后, 笔者总结归纳了现有SAR干扰技术中存在的缺陷, 并结合自己的浅薄感悟与理解指出了其发展趋势, 为该领域未来的研究方向提供一定的参考与思路。

参考文献

- [1] CUMMING I G and 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, and KENNEALLY W J. JointSTARS and GMTI: Past, present and future[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 748–761. doi: [10.1109/7.766956](https://doi.org/10.1109/7.766956).
- [3] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333–382. doi: [10.1109/5.838084](https://doi.org/10.1109/5.838084).
- [4] GOJ W W. Synthetic-Aperture Radar and Electronic Warfare[M]. Boston, M. A: Artech House, 1993.
- [5] CONDLEY C J. Some System Considerations for Electronic Countermeasures to Synthetic Aperture Radar[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1990.
- [6] 梁百川. 对合成孔径雷达的干扰[J]. *上海航天*, 1995, (1): 37–42, 47.
LIANG Baichuan. Jamming to synthetic aperture radar[J]. *Aerospace Shanghai*, 1995, (1): 37–42, 47.
- [7] DUMPER K, COOPER P S, WONS A F, *et al.* Spaceborne synthetic aperture radar and noise jamming[C]. *Proceedings of Radar 97*, Edinburgh, UK, 1997: 411–414.
- [8] 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, (4): 45–48.
CHEN Ning and ZHANG Jieru. Study of synthetic aperture radar jamming technique[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 1997, (4): 45–48.
- [9] EKESTORM S R T and KAROW C. An all-digital image synthesizer for countering high-resolution radars[D]. [Master dissertation], Naval Postgraduate School, 2000.
- [10] 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. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2002.12.040](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2002.12.040).
HU Donghui and WU Yirong. The scatter-wave jamming to SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(12): 1882–1884. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2002.12.040](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2002.12.040).
- [11] 王盛利, 于立, 倪晋麟, 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. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2003.12.035](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2003.12.035).
WANG Shengli, YU Li, NI Jinlin, *et al.* A study on the active deception jamming to SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 1900–1902. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2003.12.035](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2003.12.035).
- [12] 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. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2005.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2005.06.004).
LI Jiangyuan, WANG Jianguo, and YANG Jianyu. Similar clutter's jamming to SAR based on digital frequency memorizer[J]. *Journal of UEST of China*, 2005, 34(6): 739–742. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2005.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2005.06.004).
- [13] 李江源. 高分辨SAR干扰机理与高效干扰方法研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2007.
LI Jiangyuan. Research on jamming theory and effective jamming method to high resolution SAR[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2007.
- [14] 李伟, 梁甸农, 董臻. 基于欺骗式动目标的SAR干扰技术研究[J]. *遥感学报*, 2006, 10(1): 71–75. doi: [10.11834/jrs.20060111](https://doi.org/10.11834/jrs.20060111).
LI Wei, LIANG Diannong, and DONG Zhen. SAR jamming technique based on deceptive moving Target[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1): 71–75. doi: [10.11834/jrs.20060111](https://doi.org/10.11834/jrs.20060111).
- [15] 黄洪旭, 黄知涛, 周一宇. 对合成孔径雷达的移频干扰研究[J]. *宇航学报*, 2006, 27(3): 463–468. doi: [10.3321/j.issn:1000-1328.2006.03.027](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1328.2006.03.027).
HUANG Hongxu, HUANG Zhitao, and ZHOU Yiyu. A study on the shift-frequency jamming to SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(3): 463–468. doi: [10.3321/j.issn:1000-1328.2006.03.027](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1328.2006.03.027).
- [16] 黄洪旭, 黄知涛, 周一宇. 对合成孔径雷达的随机移频干扰[J]. *信号处理*, 2007, 23(1): 41–45. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2007.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2007.01.009).
HUANG Hongxu, HUANG Zhitao, and ZHOU Yiyu. Randomly-shift-frequency jamming style to SAR[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(1): 41–45. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2007.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2007.01.009).
- [17] 黄洪旭, 黄知涛, 吴京, 等. 对合成孔径雷达的步进移频干扰[J]. *宇航学报*, 2011, 32(4): 898–902. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2011.04.028](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2011.04.028).
HUANG Hongxu, HUANG Zhitao, WU Jing, *et al.* Stepped-shift-frequency jamming to SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(4): 898–902. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2011.04.028](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2011.04.028).
- [18] 甘荣兵, 王建国. 对SAR的几何目标欺骗干扰的快速算法[J]. *现代雷达*, 2006, 28(2): 40–42, 73. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2006.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2006.02.012).
GAN Rongbing and WANG Jianguo. Fast generation algorithm of geometric target deceive jamming signal to SAR[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(2): 40–42, 73. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2006.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2006.02.012).
- [19] 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. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2006.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2006.02.001).
- ZHANG Xixiang. Unified jamming equation of synthetic aperture radar[J]. *Journal of CAEIT*, 2006, 1(2): 107–113. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2006.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2006.02.001).
- [20] 吴晓芳, 王雪松, 卢焕章. 对SAR的间歇采样转发干扰研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2043–2048, 2072. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.050](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.050).
- WU Xiaofang, WANG Xuesong, and LU Huanzhang. Study of intermittent sampling repeater jamming to SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(5): 2043–2048, 2072. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.050](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.050).
- [21] 王雪松, 刘建成, 张文明, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学E辑信息科学, 2006, 36(8): 891–901.
- WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, *et al.* The mathematic principle of intermittent sampling repeater jamming[J]. *Science in China Series E Information Sciences*, 2006, 36(8): 891–901.
- [22] 吴晓芳. SAR-GMTI运动调制干扰技术研究[D]. [博士学位文], 国防科学技术大学, 2009.
- WU Xiaofang. Study on motion modulation jamming techniques against SAR-GMTI[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2009.
- [23] 沈爱国, 姜秋喜. 基于复卷积的超宽带SAR干扰技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 278–282. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2009.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2009.03.009).
- SHEN Aiguo and JIANG Qiuxi. UWB SAR jamming technique based on complex convolution[J]. *Journal of CAEIT*, 2009, 4(3): 278–282. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2009.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2009.03.009).
- [24] 吴晓芳, 代大海, 王雪松, 等. SAR方位向多普勒调制干扰[J]. 现代雷达, 2010, 32(10): 55–60. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2010.10.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2010.10.013).
- WU Xiaofang, DAI Dahai, WANG Xuesong, *et al.* Doppler modulation jamming in azimuth to SAR[J]. *Modern Radar*, 2010, 32(10): 55–60. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2010.10.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2010.10.013).
- [25] 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. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2010.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2010.01.001).
- WU Xiaofang, BAI Zhonggan, DAI Dahai, *et al.* Azimuth intermittent sampling repeater jamming to SAR[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(1): 1–6. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2010.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2010.01.001).
- [26] LV Bo. Simulation study of noise convolution jamming countering to SAR[C]. 2010 International Conference On Computer Design And Applications, Qinhuangdao, China, 2010: V4-130–V4-133.
- [27] YE Wei, RUAN Hang, ZHANG Shuxian, *et al.* Study of noise jamming based on convolution modulation to SAR[C]. 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun, China, 2010: 169–172.
- [28] WANG Hui, ZHANG Shunsheng, WANG Wenqin, *et al.* Multi-scene deception jamming on SAR imaging with FDA antenna[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 7058–7069. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2963042](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963042).
- [29] HUANG Bang, WANG Wenqin, ZHANG Shunsheng, *et al.* A novel approach for spaceborne SAR scattered-wave deception jamming using frequency diverse array[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(9): 1568–1572. doi: [10.1109/LGRS.2019.2950454](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2950454).
- [30] 陈思伟, 代大海, 李永祯, 等. SAR二维余弦调制相转发散射波干扰原理[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2620–2625. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2009.12.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2009.12.003).
- CHEN Siwei, DAI Dahai, LI Yongzhen, *et al.* The theory of 2-D sinusoidal phase-modulated repeater scatter-wave jamming to SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(12): 2620–2625. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2009.12.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2009.12.003).
- [31] 房明星, 王杰贵. 卷积调制的SAR雷达二维间歇采样转发干扰技术[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(7): 59–62. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2014.07.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2014.07.015).
- FANG Mingxing and WANG Jiegui. 2-D intermittent sampling repeater jamming to SAR based on convolution modulation[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(7): 59–62. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2014.07.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2014.07.015).
- [32] 董春曦, 畅鑫. 对SAR的二维多普勒移频间歇采样干扰[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2017, 44(2): 178–184. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.02.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.02.030).
- DONG Chunxi and CHANG Xin. 2-D Doppler shift-frequency intermittent sampling jamming against SAR[J]. *Journal of Xidian University*, 2017, 44(2): 178–184. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.02.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.02.030).
- [33] 贾鑫, 胡华超, 吴金亮, 等. SAR二维间歇采样转发干扰研究[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(5): 29–31. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2011.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2011.05.010).
- JIA Xin, HU Huachao, WU Jinliang, *et al.* 2-D interrupted-sampling repeater jamming against SAR[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2011, 27(5): 29–31. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2011.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2011.05.010).
- [34] 胡华超, 贾鑫, 吴彦鸿, 等. SAR二维间歇采样转发散射波干扰研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2012, 23(1): 94–97.
- HU Huachao, JIA Xin, WU Yanhong, *et al.* Research on the theory of 2-D interrupted sampling repeater scatter-wave jamming to SAR[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2012, 23(1): 94–97.
- [35] 罗强, 朱守保, 闫常浩, 等. 一种SAR压制干扰区域扩展的方法改进[J]. 电子设计工程, 2011, 19(13): 1–3. doi: [10.3969/j.issn.1674-6236.2011.13.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-6236.2011.13.001).
- LUO Qiang, ZHU Shoubao, YAN Changhao, *et al.* A new

- method on expanding barrage jamming area to SAR[J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(13): 1–3. doi: [10.3969/j.issn.1674-6236.2011.13.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-6236.2011.13.001).
- [36] 朱守保, 罗强, 童创明. 一种复合的SAR压制干扰方法研究[J]. *飞行器测控学报*, 2011, 30(6): 91–94.
ZHU Shoubao, LUO Qiang, and TONG Chuangming. A composite SAR barrage jamming method[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2011, 30(6): 91–94.
- [37] 朱守保, 罗强, 童创明. SAR压制干扰二维扩展方法的研究[J]. *火控雷达技术*, 2011, 40(3): 42–46. doi: [10.3969/j.issn.1008-8652.2011.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8652.2011.03.009).
ZHU Shoubao, LUO Qiang, and TONG Chuangming. Study on a method of 2-D expanding barrage jamming against SAR[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2011, 40(3): 42–46. doi: [10.3969/j.issn.1008-8652.2011.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8652.2011.03.009).
- [38] LIN Xiaohong, LIU Peiguo, and XUE Guoyi. Fast generation of SAR deceptive jamming signal based on inverse Range Doppler algorithm[C]. IET International Radar Conference 2013, Xi'an, China, 2013: 1–4.
- [39] LIU Yongcai, WANG Wei, PAN Xiaoyi, *et al.* Inverse omega-k algorithm for the electromagnetic deception of synthetic aperture radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(7): 3037–3049. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2543961](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2543961).
- [40] LIU Yongcai, WANG Wei, PAN Xiaoyi, *et al.* A frequency-domain three-stage algorithm for active deception jamming against synthetic aperture radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(6): 639–646. doi: [10.1049/iet-rsn.2013.0222](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0222).
- [41] 刘永才. 基于卷积调制的SAR有源欺骗干扰技术[D]. [硕士论文], 国防科技大学, 2013.
LIU Yongcai. Active deceptive jamming against SAR based on convolutional modulation[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2013.
- [42] 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: 自然科学版*, 2009, 36(5): 813–818.
SUN Guangcai, ZHOU Feng, XING Mengdao, *et al.* Deception-jamming technology against the SAR based on the deceptive scene and real-time analyses[J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(5): 813–818.
- [43] ZHOU Feng, ZHAO Bo, TAO Mingliang, *et al.* A large scene deceptive jamming method for space-borne SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(8): 4486–4495. doi: [10.1109/TGRS.2013.2259178](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2259178).
- [44] 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.
- [45] SUN Qingyang, SHU Ting, ZHOU Shicheng, *et al.* A novel jamming signal generation method for deceptive SAR jammer[C]. 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 1174–1178.
- [46] YANG Kaizhi, YE Wei, MA Fangfang, *et al.* A large-scene deceptive jamming method for space-borne SAR based on time-delay and frequency-shift with template segmentation[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 53. doi: [10.20944/preprints201911.0340.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201911.0340.v1).
- [47] 刘庆富. 对SAR/InSAR侦察与干扰方法研究[D]. [博士论文], 国防科技大学, 2013.
LIU Qingfu. Study on reconnaissance and jamming methods against SAR/InSAR[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2013.
- [48] ZHOU Feng, TIAN Tian, ZHAO Bo, *et al.* Deception against near-field synthetic aperture radar using networked jammers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(6): 3365–3377. doi: [10.1109/TAES.2019.2906414](https://doi.org/10.1109/TAES.2019.2906414).
- [49] 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 and Remote Sensing*, 2017, 10(3): 1039–1055. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2614957](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2614957).
- [50] ZHAO Bo, ZHOU Feng, and 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. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2322612](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2322612).
- [51] SUN Qingyang, SHU Ting, TANG Bin, *et al.* Target deception jamming method against spaceborne synthetic aperture radar using electromagnetic scattering[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(1): 016033.
- [52] 马德娇, 张晓玲, 余楠, 等. 基于主动式阴影消除的SAR欺骗式干扰[C]. 第四届高分辨率对地观测学术年会论文集, 武汉, 2017: 1–12.
MA Dejiao, ZHANG Xiaoling, YU Lei, *et al.* SAR deception jamming based on active shadow elimination[C]. The Fourth Annual Meeting of High Resolution Earth Observation, Wuhan, China, 2017: 1–12.
- [53] 赵明明. 基于SAR目标特征的欺骗式干扰技术研究[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2019.
ZHAO Mingming. Research on deceptive jamming technology based on SAR target characteristics[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [54] 卢庆林, 叶伟, 李国靖. 基于DCGAN的SAR虚假目标图像仿真[J]. *电子信息对抗技术*, 2020, 35(2): 57–61, 65. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2020.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2020.02.014).
LU Qinglin, YE Wei, and LI Guojing. Deceptive target SAR image simulation based on deep convolutional

- generative adversarial network[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2020, 35(2): 57–61, 65. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2020.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2020.02.014).
- [55] FAN Weiwei, ZHOU Feng, ZHANG Zijing, *et al.* Deceptive jamming template synthesis for SAR based on generative adversarial nets[J]. *Signal Processing*, 2020, 172: 107528. doi: [10.1016/j.sigpro.2020.107528](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107528).
- [56] 杨伟宏, 陈永光, 王涛. 对波形捷变SAR的间歇采样快/慢时间调制干扰[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(12): 2456–2462. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2012.12.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2012.12.09).
YANG Weihong, CHEN Yongguang, and WANG Tao. Intermittent sampling jamming against waveform agile SAR modulated in fast or slow time[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(12): 2456–2462. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2012.12.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2012.12.09).
- [57] 杨伟宏, 刘进, 王涛. SAR间歇采样散射波干扰[J]. *宇航学报*, 2012, 33(3): 367–373. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.03.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.03.013).
YANG Weihong, LIU Jin, and WANG Tao. Intermittent sampling scatter-wave jamming against SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(3): 367–373. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.03.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.03.013).
- [58] YANG Weihong and CHEN Y G. The variable intermittent sampling repeater jamming against waveform agile SAR[C]. *The 2015 International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering*, Phuket Island, Thailand, 2015. doi: [10.2991/eamc-15](https://doi.org/10.2991/eamc-15).
- [59] 张静克, 代大海, 邢世其, 等. 调频斜率极性捷变SAR欠采样转发干扰[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(4): 96–102. doi: [10.11887/j.cn.201604015](https://doi.org/10.11887/j.cn.201604015).
ZHANG Jingke, DAI Dahai, XING Shiqi, *et al.* Repeater jamming against chirp rate polarity jittered SAR based on sub-Nyquist sampling[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(4): 96–102. doi: [10.11887/j.cn.201604015](https://doi.org/10.11887/j.cn.201604015).
- [60] 张静克, 戚宗锋, 胡明明, 等. 对CRPJ-SAR间歇采样散射波转发干扰效果分析[J]. *航天电子对抗*, 2019, 35(1): 7–10, 39. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2019.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2019.01.002).
ZHANG Jingke, QI Zongfeng, HU Mingming, *et al.* Effect of intermittent sampling scatter-wave repeater jamming against chirp rate polarity jittered SAR[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2019, 35(1): 7–10, 39. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2019.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2019.01.002).
- [61] LIU Lixin, XING Shiqi, PANG Bo, *et al.* A time-frequency cross-product modulation deceptive targets generation based on interrupted sampling against WA-SAR[C]. *2019 International Symposium on Signal Processing Systems*, Beijing, China, 2019: 15–20.
- [62] 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. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.016](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.016).
WU Xiaofang, WANG Xuesong, and LIANG Jingxiu. Modulation jamming method for high-vivid false uniformly-moving targets against SAR-GMTI[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(10): 1472–1479. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.016](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.016).
- [63] 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. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.06.011](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.06.011).
WU Xiaofang, LIANG Jingxiu, WANG Xuesong, *et al.* Modulation jamming method of active false uniformly-accelerating targets against SAR-GMTI[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(6): 761–768. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.06.011](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.06.011).
- [64] 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. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.003).
WU Xiaofang, DAI Dahai, WANG Xuesong, *et al.* A novel method of active jamming for SAR based on micro motion modulation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 954–959. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.003).
- [65] 张静克, 汪亚, 戚宗锋, 等. 多通道SAR-GMTI虚假运动目标成像特性分析[J]. *航天电子对抗*, 2018, 34(5): 9–13, 33. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2018.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2018.05.003).
ZHANG Jingke, WANG Ya, QI Zongfeng, *et al.* Image characteristic analysis of deceptive moving target in multi-channel SAR-GMTI[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2018, 34(5): 9–13, 33. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2018.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2018.05.003).
- [66] SUN Qingyang, SHU Ting, YU K, *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. doi: [10.1109/JSEN.2019.2908030](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2908030).
- [67] SUN Qingyang, SHU Ting, YU K, *et al.* Efficient deceptive jamming method of static and moving targets against SAR[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(9): 3610–3618. doi: [10.1109/JSEN.2018.2813521](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2813521).
- [68] CHANG Xin and DONG Chunxi. A barrage noise jamming method based on double jammers against three channel SAR GMTI[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 18755–18763. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2897043](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897043).
- [69] 周阳, 毕大平, 房明星, 等. 对SAR-GMTI的运动调制-步进移频复合干扰[J]. *信号处理*, 2016, 32(12): 1468–1477. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2016.12.012](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2016.12.012).
ZHOU Yang, BI Daping, FANG Mingxing, *et al.* A motion modulated and step frequency shifting compound interference to SAR-GMTI[J]. *Journal of Signal Processing*, 2016, 32(12): 1468–1477. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2016.12.012](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2016.12.012).
- [70] 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, 91. doi: [10.16592/j.issn.1000-1328.2016.09.003](https://doi.org/10.16592/j.issn.1000-1328.2016.09.003).

- j.cnki.1004-7859.2016.09.017.
- ZHOU Yang, BI Daping, FANG Mingxing, *et al.* A smart area shading jamming method for SAR-GMTI[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(9): 79–85, 91. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.09.017](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.09.017).
- [71] 周阳, 毕大平, 沈爱国, 等. 对合成孔径雷达的运动调制间歇采样干扰方法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(3): 112–117.
- ZHOU Yang, BI Daping, SHEN Aiguo, *et al.* Motion modulation intermittent sampling repeater jamming against SAR[J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(3): 112–117.
- [72] 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. doi: [10.12000/JR16075](https://doi.org/10.12000/JR16075).
- ZHOU Yang, BI Daping, SHEN Aiguo, *et al.* Intermittent sampling repeater shading jamming method based on motion modulation for SAR-GMTI[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 359–367. doi: [10.12000/JR16075](https://doi.org/10.12000/JR16075).
- [73] 房明星, 毕大平, 沈爱国. 多通道SAR-GMTI二维余弦调相散射波干扰[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(3): 356–364. doi: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.03.015](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.03.015).
- FANG Mingxing, BI Daping, and SHEN Aiguo. 2-D cosinusoidal phase-modulated scatter-wave jamming to multi-channel SAR-GMTI[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(3): 356–364. doi: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.03.015](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.03.015).
- [74] 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]. 火箭与制导学报, 2018, 38(2): 150–154, 160.
- ZHOU Yang, BI Daping, and SHEN Aiguo. A cosinusoidal phase-modulated intermittent sampling false targets jamming method to SAR-GMTI based on motion modulation[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2018, 38(2): 150–154, 160.
- [75] 刘业民, 刘忠, 代大海, 等. 基于微动调制的SAR新型复合有源干扰方法[J]. 现代防御技术, 2011, 39(4): 84–89, 117. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2011.04.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2011.04.018).
- LIU Yemin, LIU Zhong, DAI Dahai, *et al.* Novel method of composite active jamming for SAR based on micro-motion modulation[J]. *Modern Defence Technology*, 2011, 39(4): 84–89, 117. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2011.04.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2011.04.018).
- [76] 刘业民, 刘忠, 代大海, 等. 基于微动调制的间歇采样转发干扰研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(11): 2417–2424. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2011.11.017](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2011.11.017).
- LIU Yemin, LIU Zhong, DAI Dahai, *et al.* Micro motion modulation-based intermissive sampling and repeating jamming method[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(11): 2417–2424. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2011.11.017](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2011.11.017).
- [77] 降佳伟, 吴彦鸿, 王宏艳, 等. 一种对SAR-GMTI的密集假目标干扰技术[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(1): 9–14, 88.
- JIANG Jiawei, WU Yanhong, WANG Hongyan, *et al.* A dense false target jamming technique against SAR-GMTI[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2016, 39(1): 9–14, 88.
- [78] 张静克, 代大海, 邢世其, 等. 基于微动调制的InSAR有源干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 661–666. doi: [10.3969/j.issn.i001-506X.2014.04.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.i001-506X.2014.04.09).
- ZHANG Jingke, DAI Dahai, XING Shiqi, *et al.* Active jamming method for InSAR based on micro motion modulation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(4): 661–666. doi: [10.3969/j.issn.i001-506X.2014.04.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.i001-506X.2014.04.09).
- [79] 黄龙, 董春曦, 赵国庆, 等. 多干扰机InSAR欺骗干扰方法[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1714–1723. doi: [10.7527/S1000-6893.2013.0434](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2013.0434).
- HUANG Long, DONG Chunxi, ZHAO Guoqing, *et al.* InSAR deception jamming method based on multiple jammers[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(6): 1714–1723. doi: [10.7527/S1000-6893.2013.0434](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2013.0434).
- [80] WU Zhefeng, XU Huaping, LI Jingwen, *et al.* Research of 3-D deceptive interfering method for single-pass spaceborne InSAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 2834–2846. doi: [10.1109/TAES.2015.140325](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140325).
- [81] 唐波. 干扰机运动对SAR方位双通道抑制的影响[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(1): 40–45. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.01.008).
- TANG Bo. Effect of jammer motion on SAR dual-channel cancellation in azimuth[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(1): 40–45. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.01.008).
- [82] 黄龙, 董春曦, 赵国庆. 利用多干扰机对抗SAR双通道干扰对消技术的研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 903–907. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00887](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00887).
- HUANG Long, DONG Chunxi, and ZHAO Guoqing. Investigation on countermeasure against SAR dual-channel cancellation technique with multi-jammers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 903–907. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00887](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00887).
- [83] 黄龙, 董春曦, 沈志博, 等. 多天线干扰机对抗InSAR双通道干扰对消的研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 913–918. doi: [10.11999/JEIT140769](https://doi.org/10.11999/JEIT140769).
- HUANG Long, DONG Chunxi, SHEN Zhibo, *et al.* Investigation on countermeasure against InSAR dual-channel cancellation technique with multi-antenna jammer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 913–918. doi: [10.11999/JEIT140769](https://doi.org/10.11999/JEIT140769).
- [84] 张云鹏, 毕大平, 房明星, 等. 对SAR双通道对消的方位向间歇采样散射波干扰[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2832–2839. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.003).
- ZHANG Yunpeng, BI Daping, FANG Mingxing, *et al.* Azimuth intermittent sampling scatter-wave jamming

- against SAR dual-channel cancellation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(12): 2832–2839. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.003).
- [85] 张云鹏, 毕大平, 周阳, 等. 余弦调相散射波干扰对SAR双通道对消干扰抑制的影响[J]. 遥感学报, 2019, 23(1): 99–107. doi: [10.11834/jrs.20197114](https://doi.org/10.11834/jrs.20197114).
ZHANG Yunpeng, BI Daping, ZHOU Yang, *et al.* Effect of cosinusoidal phase-modulated scatter-wave jamming to the jamming suppression of SAR dual-channel cancellation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 99–107. doi: [10.11834/jrs.20197114](https://doi.org/10.11834/jrs.20197114).
- [86] SCHEHER D C. *Electronic Warfare in the Information Age*[M]. Boston, MA: Artech House, 2000.
- [87] 吴晓芳, 代大海, 王雪松, 等. 合成孔径雷达电子对抗技术综述[J]. 信号处理, 2010, 26(3): 424–435. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2010.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2010.03.017).
WU Xiaofang, DAI Dahai, WANG Xuesong, *et al.* Review of synthetic aperture radar electronic countermeasures[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(3): 424–435. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2010.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2010.03.017).
- [88] 刘玉玲. SAR有源假目标精确位置欺骗干扰技术研究[D]. [硕士学位论文], 国防科学技术大学, 2012.
LIU Yuling. Research on SAR precisely position deception jamming[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2012.
- [89] 黄岩, 赵博, 陶明亮, 等. 合成孔径雷达抗干扰技术综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 86–106. doi: [10.12000/JR19113](https://doi.org/10.12000/JR19113).
HUANG Yan, ZHAO Bo, TAO Mingliang, *et al.* Review of synthetic aperture radar interference suppression[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 86–106. doi: [10.12000/JR19113](https://doi.org/10.12000/JR19113).

作者简介



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。
E-mail: e0061@sina.com



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



黄大通(1993–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达信号处理与对抗。



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。