

空天基合成孔径雷达多域抗干扰技术综述

江 凯

(中国电子科技集团公司第三十八研究所孔径阵列与空间探测安徽省实验室, 安徽合肥 230088)

摘要: 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是现代雷达技术发展的主要成就之一,具有全天候、全天时、高分辨率的特性,广泛应用于空基及天基各类平台。现代战场电磁环境日趋恶劣,电子战装备可以在多维度产生高强度、多样式和有针对性的电子干扰,极大制约了SAR作战效能的发挥,如何提高SAR抗干扰能力已成为当前国内外该领域研究热点。本文探讨了SAR常规抗干扰思路和优缺点,并以雷达信号发射和信号接收两个方面为主线,围绕空域、时域、频域、能量域、极化域以及数据处理域等多域,结合仿真和试验数据分析了典型空天基SAR抗干扰方法的实施效果,最后分析其未来的发展趋势,为以后的相关技术研究提供参考。

关键词: 合成孔径雷达; 空/天基; 干扰; 抗干扰技术

中图分类号: TN958 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2024)04-0355-14

引用格式: 江凯. 空天基合成孔径雷达多域抗干扰技术综述[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(4): 355-368.

JIANG Kai. Review on Anti-Jamming Technology of Airborne/Space-Based SAR[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(4): 355-368.

Review on Anti-Jamming Technology of Airborne/Space-Based SAR

JIANG Kai

(Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, the 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) is one of the significant achievements in the development of modern radar technology, with the characteristics of all-weather, all-day and high resolution, which is widely applied to airborne and space-based platforms. The electromagnetic environment of modern battlefield is becoming increasingly deteriorating, and electronic warfare equipment can generate high-intensity and targeted jamming in multiple dimensions, greatly restricting the effectiveness of SAR operations. How to improve the anti-jamming ability of SAR has become a hotspot in domestic and international researches. The anti-jamming methods in space domain, time domain, frequency domain, energy domain, polarization domain, and data processing domain based on signal transmission and reception are mainly studied in this paper. The advantages and disadvantages of conventional anti-jamming in SAR are discussed, and the implementation effects of common anti-jamming methods are illustrated by combing simulation and experimental data. Finally, the development trend of SAR is analyzed, providing reference for future relevant technology research.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); airborne/space-based; jamming; anti-jamming technology

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是现代雷达技术发展的主要成就之一,具有全天候、全天时、高分辨率的特性^[1-3]。经过多年发展, SAR已从最初的单频段、单极化、单模式等向着多频段、多极化、多模式及高分辨等方向发展^[4],其系统可以装载于星载、弹载及机载等典型的空天基

平台中,国内外均高度重视SAR的发展,目前有多个先进的SAR系统正在运行或在研之中。

然而,空天基SAR在执行作战任务过程中,不但要面临传统意义上的电子干扰,如各种压制或欺骗干扰,还有地杂波、海杂波和气象杂波等自然干扰,同时还存在电磁兼容问题^[5]。因此, SAR抗干扰技术的研究一直备受关注,相关科研机构与院校也不断研发出新的SAR抗干扰技术和系统,

以适应未来战争的需求,抗干扰能力是雷达效能和武器装备战场生存能力的重要指标^[6-7]。

本文将围绕空天基SAR常规抗干扰思路和方法展开论述,并介绍常用的SAR干扰和SAR抗干扰措施,通过仿真和试验数据说明常用SAR抗干扰方法的实施效果,最后分析未来空天基SAR抗干扰技术的发展趋势。

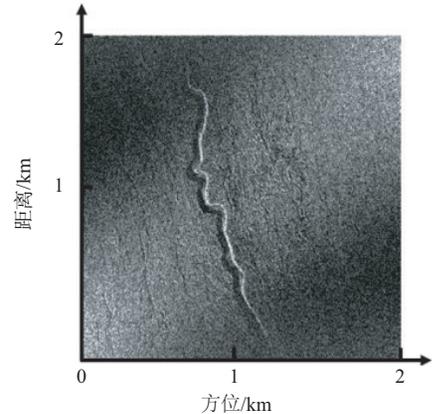
1 SAR干扰技术

SAR基于安装在平台上的雷达不断发射和接收宽带信号,通过形成等效于大天线的虚拟孔径和脉冲压缩技术,分别提高方位向和距离向分辨率。雷达干扰是扰乱或破坏雷达正常工作性能的技术或方法总称^[8],从不同的角度出发,可将雷达干扰样式分成不同的类别,如以干扰能量的来源可将干扰信号分为有源干扰和无源干扰;按照干扰的人为因素可将干扰信号分为有意干扰和无意干扰;以干扰机理,可将其分为遮盖性和欺骗性干扰;以空间相对位置关系,则可将其分为远距离支援干扰、随队干扰和自卫干扰等。

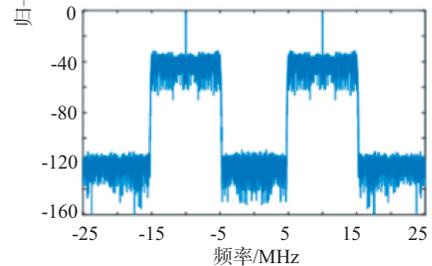
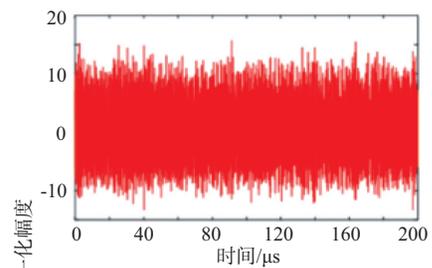
SAR成像易受到有源干扰的影响,从干扰信号的样式可以划分为噪声压制干扰、相参压制干扰、多假目标干扰及各种组合干扰等^[9-10],导致SAR的图像质量明显下降。对SAR的干扰种类主要包括有噪声压制干扰、相参压制干扰、多假目标欺骗干扰及组合干扰。其中噪声压制干扰主要通过产生大功率噪声,对SAR系统进行干扰,降低SAR回波信噪比,从而使得SAR图像质量恶化。更进一步地,如果获取了SAR的工作频率等信息,则可将有限的干扰功率集中在目标频段内进行瞄频干扰。相参压制干扰则是在得到目标SAR的信息后,产生与SAR信号相参的信号,降低成像信号的相干性。若能获取SAR平台运行信息和雷达信号等参数,可以对其进行相干欺骗干扰,通过距离/方位向二维卷积的方式生成干扰信号,在SAR图像中呈现虚假目标,实现欺骗的目的。一般来说,SAR图像动态范围较大,单独一种样式的干扰效果不理想,通过组合噪声压制、相干压制及假目标等多种干扰能在SAR图像中形成大量离散噪声和相干欺骗,会给图像解译带来困难。

为说明干扰的效果,图1给出了不同干扰类型

的干扰结果。图1(a)为无干扰SAR图像,图1(b)、(c)和(d)分别为噪声干扰、多假目标干扰和相参压制+窄带瞄频组合干扰的干扰结果。从干扰结果可知,若不能很好地实施抗干扰策略,将会大大降低SAR的成像质量,影响其作战效能。

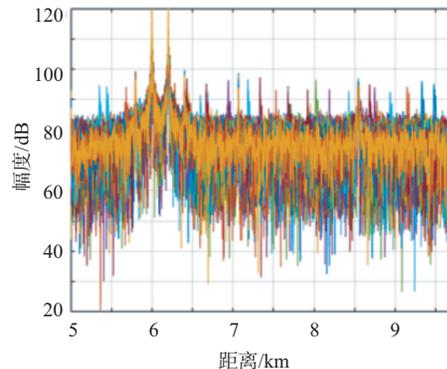


(a) 无干扰

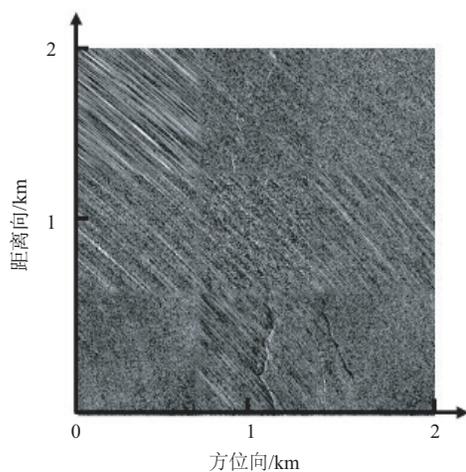


(b) 噪声干扰

方位角: -13 俯仰角: 0 脉压结果



(c) 多假目标干扰



(d) 组合干扰

图1 不同类型干扰下的SAR图像

2 SAR抗干扰技术

干扰的分类方式多种多样,若干扰机能快速截获雷达发射信号,通过提取载频、重频、波达方向等参数,则可以对SAR雷达实施精准干扰^[11-12]。此外,雷达工作在复杂的电磁环境中,不但要面临传统意义上的电子干扰,还存在如地/海杂波等自

然干扰^[13]。因此,抗干扰能力是雷达效能和武器装备战场生存能力的关键指标,研究不同平台、不同处理域的抗干扰技术至关重要。

SAR主要搭载于机载、星载和弹载平台,从空天基平台的差异性来说,机载平台飞行高度与速度均较低,可在其侦察实施全程中进行干扰,因此其干扰种类多,以相干干扰等有源干扰为主。相应地,其载荷能力强,抗干扰资源相对丰富,可综合运用射频对抗和复杂波形设计等多种抗干扰技术。星载平台高度和速度均较大,但卫星运行轨道是预设不变的,获取运行轨迹即可对其实施干扰。此外,传统星载SAR较少采用超低副瓣技术,在较大覆盖范围内可以通过多种干扰设备对天线副瓣进行干扰,因此星载SAR的抗干扰措施目前主要以旁瓣抗干扰为主。与前两者相比,弹载平台空间小且具有攻击性,面临的电磁干扰环境更加复杂,有源和无源干扰种类多,以主瓣干扰为主,旁瓣干扰亦较强。对于弹载平台SAR的抗干扰,往往要综合多种抗干扰策略才能获得较好的成像结果。表1概述了不同空天基平台SAR的干扰与抗干扰技术特点。

表1 不同平台抗干扰技术特点

空天基平台类别	干扰特点	抗干扰技术特点
机载SAR	干扰种类多,支援式干扰等有源干扰为主,受干扰距离近,平台速度较慢,干扰指向跟踪相对容易	以旁瓣抗干扰技术为主;载荷能力大,抗干扰资源相对丰富,如阵列多通道、高能量、强处理性能等,可综合运用射频对抗和复杂波形抗干扰技术等
星载SAR	周期性轨道易受干扰,旁瓣有源干扰为主,干信比较大;星载平台抗干扰能力升级代价大	以旁瓣抗干扰技术为主;抗干扰资源对载荷研制与发射成本影响较大;大阵列设计,具有空域抗干扰优势
弹载SAR	主瓣干扰为主,旁瓣干扰亦较强;有源/无源干扰种类多;平台速度快,干扰捕获难度较大	主瓣、副瓣抗干扰均很重要,对干扰识别要求高,受限于弹载平台小空间、低功耗,抗干扰资源紧张;有源/无源综合抗干扰技术

从抗干扰的具体技术来说,无论SAR系统搭载于何种平台,抗干扰的本质是为了找到信号与干扰的可分域^[14-15],典型的抗干扰处理域包括空域、时域、频域、能量域、极化域以及数据处理域等,各处理域及对应的抗干扰技术在表2列出。在空域上采取的抗干扰措施主要有低副瓣接收天线技术、自适应零点形成等技术;在时域上主要是波形捷变和掩护脉冲等;在频域上主要包括频率捷变、重频捷变等;在能量域上主要是功率对抗(脉冲压缩、长时间脉冲积累)等;极化域采取的抗干扰措施主要有极化滤波、极化目标识别等;在数据

处理域上主要包括自适应虚警控制、干扰剔除和数据滤波技术。需要指出的是,本文的数据处理域主要是指前端信号处理目标检测之后,围绕对目标点迹和航迹等目标信息的处理自由度,包含位置、多普勒、航向等信息,与空域、时域、频域和极化域等为并列关系。

从系统设计角度来说,空天基SAR抗干扰技术的实施主要集中在信号发射端和信号接收端,上述不同域的抗干扰技术均在发射端和接收端有所体现。其中信号发射方面如能量域的发射功率管控、频域的频率捷变、时域的掩护脉冲和波形编

表 2 SAR 多域抗干扰技术

类别	多域抗干扰技术
空域	低副瓣接收天线技术、自适应零点形成、旁瓣对消技术等
时域	波形捷变技术、波形编码技术、掩护脉冲技术等
频域	频率捷变技术、重频捷变技术等
能量域	功率管控技术、脉冲压缩与相参非相参积累技术等
极化域	极化滤波技术、极化目标识别技术等
数据处理域	自适应虚警控制、干扰剔除和数据滤波技术等

码等;接收方面如空域的旁瓣对消副瓣匿隐天线设计、极化域的极化天线设计及数据处理域的滤波处理等。抗干扰性能主要体现在两个方面:一是雷达信号的低截获性,即发射端雷达信号的相关参数难以被敌方系统捕获;二是受到干扰时雷达系统的功能稳定性,即接收端雷达系统能够有效抑制干扰,并保持功能完整和稳定性。因此,本文将以信号发射和信号接收两个方面为主线,围绕空域、时域、频域、能量域、极化域以及数据处理域等多域展开探讨,其中信号发射方面主要是针对射频频对抗及复杂波形抗干扰设计,信号接收方面主要针对多维接收和滤波处理抗干扰设计。

2.1 射频频对抗及复杂波形抗干扰技术

改善目标探测性能,避免干扰系统对信号的快速、准确截获和识别,设计具有低截获、抗干扰的波形,是抗干扰 SAR 系统设计的重要一环。围绕波形优化低截获抗干扰设计,有大量的研究成果,如最初的利用随机信号设计波形提高系统的抗干扰性能^[16],通过结合时域随机线性调频和 OFDM 生成复杂信号,增加发射信号的识别难度,从而提升 SAR 的抗干扰性能^[17]。此外,基于波形分集,通过频域正交编码信号,可实现距离欺骗干扰抑制^[18]。更进一步地,通过慢时域、快-慢时域、时-频域多域联合的方式,可实现密集假目标的干扰抑制^[19]。这类方法的主要思想是通过调整雷达发射波形的相关参数,控制调整发射功率,增加对方接收机侦收和识别难度^[20]。

结合工程实际,通过发挥数字阵列雷达波束、波形等空、时参数捷变特点,根据不同模式,发射波形可以采用能量域发射功率控制、时域相位编码波形设计、规律性频率捷变以及时频域联合等

方式,降低雷达发射信号被截获的概率,提升主动抗干扰能力。其中能量域主要通过发射功率管控,自适应地调节主波形和辅波形的时序关系,实现两者之间的功率密度配比来调节主波形的发射阵面利用率,可达满足主副瓣低截获的指标要求。能量域方法较少单独使用,在实际应用中常与其他方法联合设计,下面主要介绍时域、频域以及时频联合域等典型抗干扰方法。

2.1.1 时域相位编码波形抗干扰

线性调频信号和相位编码信号(Phase Coded Waveform, PCW)是雷达常用的两种发射波形,其中 PCW 通过在脉冲的持续时间内,不断改变相位值,提高雷达发射信号的识别难度^[21-23]。时域线性调频 LFM 信号可表示为

$$x(t) = \exp(j\pi Bt^2/T), 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

与线性调频信号相比,相位编码信号具有扩频特性,可通过特定相位和相同宽度的子脉冲获得。可以表示为

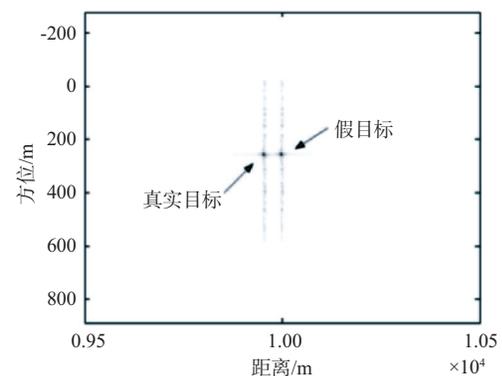
$$s(t) = a(t)\exp(j\varphi(t))\exp(j2\pi ft) \quad (2)$$

其包络函数为

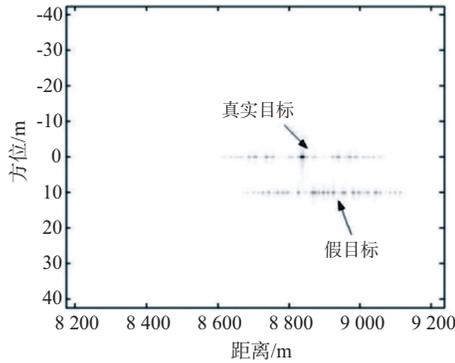
$$u(t) = a(t)\exp(j\varphi(t)) \quad (3)$$

式中 $\varphi(t)$ 为相位调制函数,对于二相编码信号来说,其相位在 0 和 π 之间变化,常见的编码包括巴克码、互补码、 m 序列等。当相位在多值之间变化对应的为多相码,如 Frank 码、P 相码。

图 2 给出了在有源欺骗干扰的影响下,分别基于二相位编码和常规 LFM 信号的 SAR 成像结果。比较可知,相位编码信号的真实目标聚焦能力更强,具有较高的伪随机性、低截获性和抗干扰能力。



(a) 基于 LFM 信号无编码的 SAR 成像结果



(b) 基于 m 序列编码信号的 SAR 抗干扰结果

图2 不同发射波形下的 SAR 图像

对于相位编码波形中存在的波形频谱展宽的现象,可通过能量域的脉冲压缩消除该影响,在保持低截获特性的同时,获得较高的距离分辨率。需要指出的是,本方法本质上是时域-能量域联合的方式,在对强干扰环境中的弱小目标进行检测时,其性能会显著下降。

2.1.2 频率捷变抗干扰

传统雷达脉间波形参数大多采用高重频、中重频和低重频等固定模式,随着波形产生器等技术的大力发展,波形参数捷变受到了广泛关注,其主要通过对脉间初相、脉冲重复间隔等脉间参数随机跳变,应对传统雷达脉间参数重复、单一抗干扰能力差等问题^[24-26]。

频率捷变技术已得到广泛应用,基于捷变体制的雷达,可通过软件生成多种发射模型,同时结合脉冲间频率的跳变,降低了被截获的可能性,具有较强的抗干扰能力。需要注意的是,虽然 SAR 雷达信号在距离和方位向都具有大时宽带宽积,具有一定抗干扰能力,但是由于 SAR 成像需要满足一定数量的脉冲积累并保证积累的相参性,采用常规随机捷变发射信号,回波采集后信号处理无法进行相参积累。为保证 SAR 成像质量,SAR 系统抗干扰采用规律性频率捷变技术,即在预定频点上按照规律进行变化,这种变化具有重复性的特点,图3给出了规律性频率捷变示意图。

在密集假目标干扰下,图4分别给出了无捷变和载频-重频捷变的脉冲压缩结果。比较可知,无抗干扰措施的情况下,真实目标淹没于周围的密集假目标中,采用捷变抗干扰策略后,脉冲压缩结果中仅有部分脉冲存在干扰信号,显著提升了系

统的抗干扰能力。

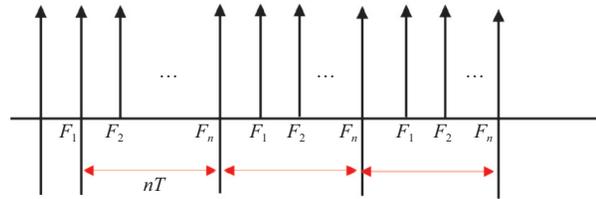
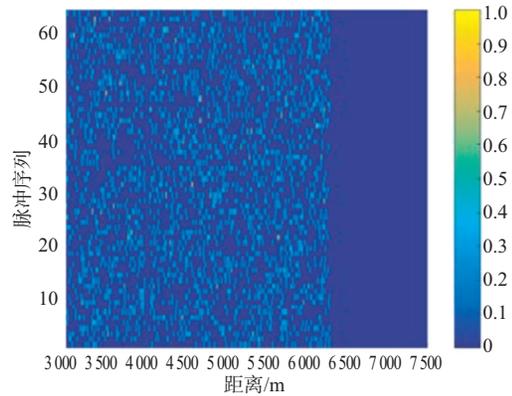
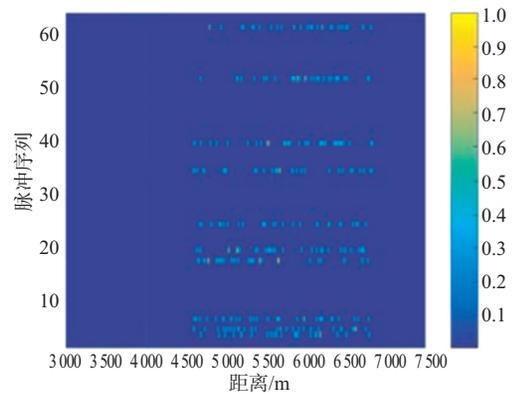


图3 规律性频率捷变示意图



(a) 密集假目标干扰脉冲压缩结果



(b) 载频-重频捷变抗干扰脉冲压缩结果

图4 捷变抗干扰处理结果

2.1.3 时频联合域抗干扰

时域射频掩护是一种经典的抗干扰措施,具有简单高效的抗干扰性能^[27-28]。在 SAR 系统抗干扰设计中,掩护脉冲与工作发射信号需在不同频点,考虑到一般干扰机采用前沿瞄准式工作方式,发射瞬时带宽不超过 2 GHz,因而设计常采用窄脉宽掩护脉冲,如图5所示。同一个 PRT 内,在工作脉冲 f 前先发射 2 个窄脉冲 f_1, f_2 ,这两个掩护脉冲频率设计值远超出工作脉冲频率。干扰机接收到掩护脉冲信号后转发,干扰信号频率超出雷达实际工作频率范围,实现雷达工作频点掩护,降低可

探测性。

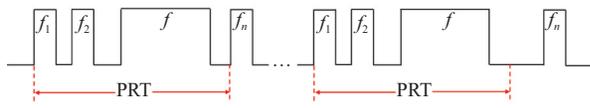
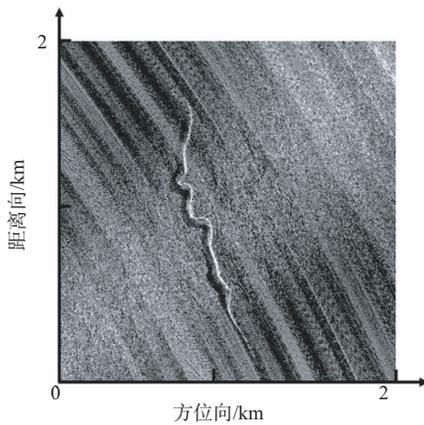
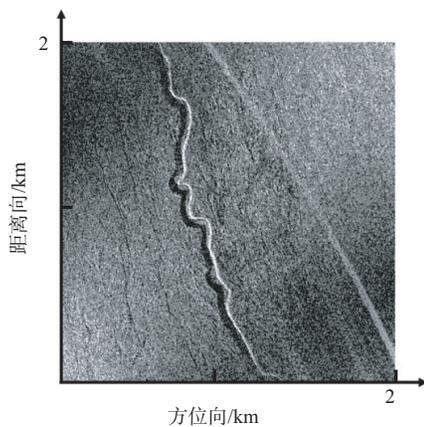


图5 窄脉宽射频掩护脉冲示意图

在实际应用中往往采用组合策略,如同时采用频率捷变和掩护脉冲,能够显著降低敌方的干扰效果。图6(a)为某次试验未开启频率捷变和掩护脉冲时频域联合策略SAR成像结果,图6(b)为开启捷变相应抗干扰措施后的成像结果,比较可知,组合策略能够抑制干扰,提升整体成像质量。



(a) 未开启抗干扰策略



(b) 开启频率捷变和掩护脉冲策略

图6 SAR成像结果

2.2 多维接收和滤波处理抗干扰技术

通过射频对抗波形优化设计的方式,降低敌方干扰系统对我方信号截获和识别的可能性,实现具有低截获、抗干扰的波形,在一定程度上可以

实现SAR系统抗干扰能力的提升,但干扰无法完全抑制。实际应用中,虽然波形优化设计性能较好,但接收信号仍然包含了干扰,因此需要从接收信号中滤除干扰信号,才能提升SAR图像质量。

对于SAR系统的接收来说,SAR天线的干扰主要从副瓣和主瓣两个角度进入系统中,其中副瓣干扰可通过空域抗干扰方法抑制,主要包括有超低副瓣天线设计、自适应旁瓣对消及副瓣匿影等,主瓣干扰则可以通过极化天线及多平台协同的方式弱化。与前者相比,极化抗干扰具有更多的研究成果^[29-31],如基于欺骗干扰信号和目标回波信号在极化域的差异,通过极化滤波和投影实现干扰抑制。在此基础上,对于进入系统的干扰,则通过数据处理域的算法滤除干扰信号的影响,采用非参数化方法如信号成分分解、子空间投影等方法;采用半参数化方法如稀疏空间重构和参数化方法如RELAX方法及迭代自适应方法等^[6],提升SAR图像质量。

结合工程实际,下面主要对典型的空域副瓣/旁瓣天线抗干扰、极化域天线抗干扰及数据域处理算法抗干扰等手段展开论述。

2.2.1 空域副瓣/旁瓣抗干扰

2.2.1.1 超低副瓣天线抗干扰

当雷达处于强干扰环境中,来自旁瓣的干扰往往会影响到主瓣中的目标信号,超低旁瓣天线可以消除这种影响^[32]。传统模拟相控阵天线由于受移相器相位精度和衰减器幅度控制精度以及通道幅相误差的限制,一般接收幅度误差范围为0.8 dB,相位误差范围为 9° ,很难获取低的天线副瓣,对系统方位模糊和抗干扰性能具有较大的影响。

与模拟相控阵相比,数字相控阵通道接收幅度误差范围可控制在0.2 dB内,相位误差范围控制在 1° 范围内。同样的理论副瓣加权条件下,数字阵列天线可以获得比模拟相控阵天线更低的最大副瓣数学期望。对于同样-50 dB加权,模拟相控阵最大副瓣的数学期望为-39.5 dB左右,数字阵列雷达最大副瓣的数学期望为-49.5 dB左右。并且数字相控阵天线可以通过较弱的口径加权深度获得较低的天线副瓣,进而提高天线口径利用率和天线增益。

2.2.1.2 自适应旁瓣对消抗干扰

与超低旁瓣天线技术相比,旁瓣对消技术成本更低,其利用辅助天线,即可实现主接收通道中的旁瓣干扰抑制。自适应旁瓣对消系统的实质是基于主/辅天线中干扰信号的相关性,通过自适应调整权值消除干扰信号的影响,以系统干扰输出功率最小为约束,使对消效果最佳,实现干扰抑制^[33-34]。如图7所示,在辅助天线自由度不小于干扰源数的前提下,将辅天线设置在主天线周围,减小两者天线的相位中心距离,从而确保辅助天线接收信号和雷达天线副瓣接收信号的相关性。

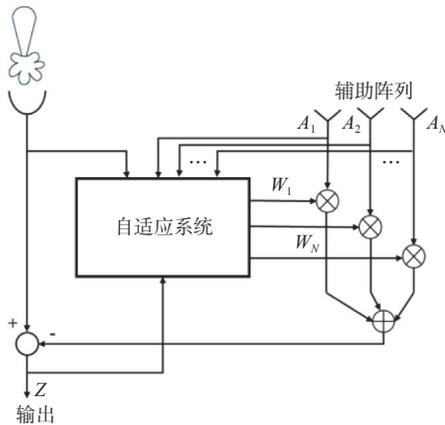
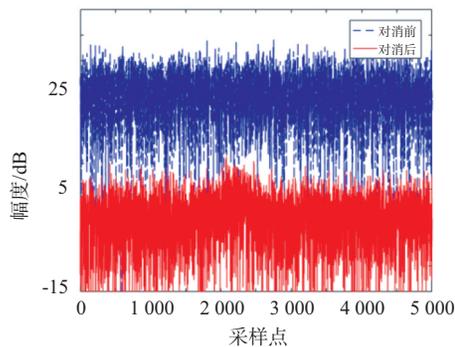
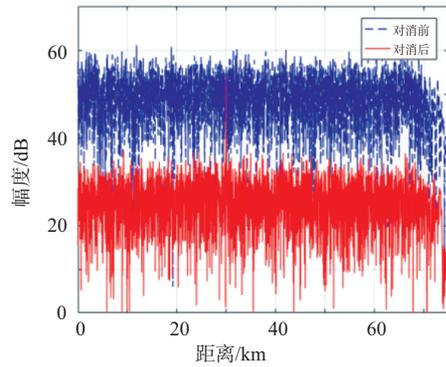


图7 自适应对消的工作原理

下面通过仿真说明上述方案的有效性,设置LFM信号采样频率10 MHz,脉冲重复周期500 μs,脉冲宽度50 μs,调频带宽4 MHz,假设目标位于30 km处。放置一噪声阻塞干扰源,主通道干噪比为25 dB,辅助通道干噪比为27 dB。对主通道和辅助通道信号均做自适应旁瓣对消处理,抑制压制式干扰成分。图8(a)表示旁瓣对消结果,图8(b)表示旁瓣对消联合脉冲压缩处理后的输出结果,对消比可达24 dB。



(a) 旁瓣对消输出结果



(b) 旁瓣对消联合脉冲压缩结果

图8 主通道输出结果

2.2.1.3 副瓣匿影抗干扰

与旁瓣对消类似,旁瓣匿影同样以降低旁瓣干扰为目标,但对于不同类型的干扰处理,两者效果不一样。如对于转发式假目标干扰,对消处理性能会显著下降,旁瓣匿影则可以较好抑制该类型干扰^[35-36]。典型的匿影系统主、辅天线方向图由图9给出,理想情况下,副匿影所采用的辅助天线平均增益介于雷达主天线主瓣和旁瓣增益之间^[37],并高于第一副瓣2~3 dB。

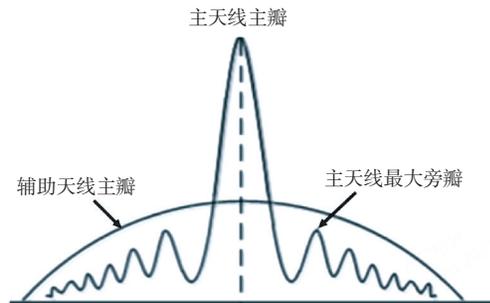


图9 主、辅天线方向图

图10给出了旁瓣匿影原理图,一般来说,与辅助通道中的回波强度相比,在主瓣中的目标会在主通道中产生更强的回波信号,通过采用合适的匿影门限比较两通道中的信号,消除可能从主天线旁瓣进入系统的干扰信号,从而保持雷达系统功能的完整性和稳定性。

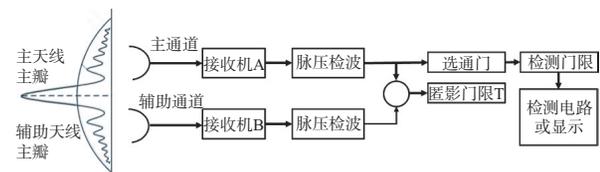
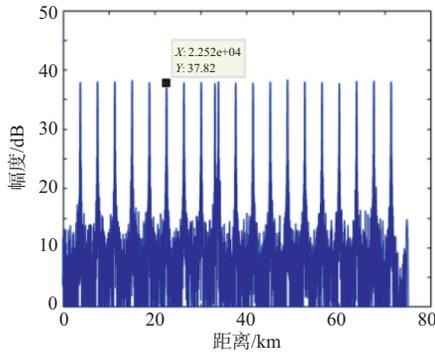
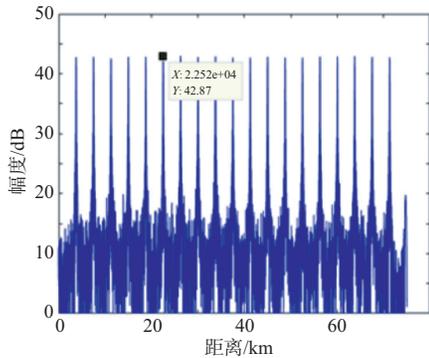


图10 旁瓣匿影原理示意图

下面通过仿真说明方案的有效性,设置主通道干噪比 10 dB,信噪比 10 dB,辅助通道干噪比 12 dB,信噪比 -25 dB,图 11 分别为主通道(图 11(a))和辅助通道(图 11(b))脉冲压缩结果,图 12 给出了匿影输出结果。对比可知,经旁瓣匿影处理,密集假目标干扰被有效抑制。需要指出的是,对于接收的目标信号,主天线要比辅助天线强,而对于干扰信号,则主天线要弱于辅助天线,满足上述条件,本方法才具有较好的干扰抑制效果。此外,假目标与真实目标脉压后不能在同一距离单元。



(a) 主通道脉压输出结果



(b) 辅助通道脉压输出结果

图 11 主通道和辅助通道脉冲压缩结果

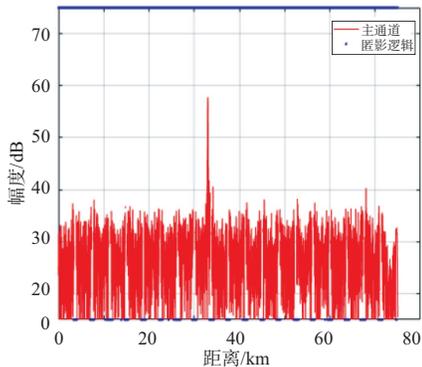


图 12 旁瓣匿影输出结果

2.2.2 极化域天线多极化抗干扰

随着数字射频技术的发展,SAR 干扰技术也在不断改进,传统时/频/空域的干扰抑制方法面临着更大的挑战。极化信息的获取与处理技术是从极化域抑制干扰,雷达极化抗干扰的本质是利用干扰与目标在极化域的差异,减弱或消除干扰对雷达探测的影响。通过改变雷达接收极化可用于抑制雨杂波、地/海杂波及宽带阻塞压制等多种干扰^[38-40]。围绕极化域与空、时域联合处理的问题,国防科技大学、电子科技大学及哈尔滨工业大学等单位也开展了相关研究^[41-42]。对于极化 SAR 系统,国内外早已开展了相应的研究工作,如美国的 JPL/CV-990 多波段极化、Ka 波段机载极化 SAR 系统及美/德/意联合研制的星载 SIR-C/X-SAR 系统等。中科院电子所、中国电科 38 所也先后研制出相应的多极化 SAR 系统。

雷达系统的整体性能主要由天线性能决定,当天线与入射信号极化匹配则可以完全接收信号,极化不匹配则难以接收到信号。因而可通过改变天线的极化特性,改善雷达系统的干扰抑制能力。设天线有效长度为 L ,接收到的电磁波矢量用 \mathbf{E} 表示,则接收信号可表示为

$$x = \mathbf{E}^T \mathbf{L} \quad (4)$$

定义实际接收功率与最大接收功率之比为

$$\rho = \frac{|\mathbf{E}^T \mathbf{L}|^2}{|\mathbf{E}|^2 |\mathbf{L}|^2} = \frac{|\mathbf{E}|^2 |\mathbf{L}|^2 \cos^2 \beta}{|\mathbf{E}|^2 |\mathbf{L}|^2} = \cos^2 \beta \quad (5)$$

式中 $0 \leq \rho \leq 1$ 表示极化匹配系数, β 为两矢量的夹角。 ρ 反映了天线与入射信号的极化匹配度,若入射信号完全被天线接收,则表明两者极化完全匹配 $\rho=1$; 如入射信号无法被天线接收,则表明两者极化不匹配 $\rho=0$ 。

一般工程上,微带天线正交极化隔离度大于 20 dB,波导天线正交极化隔离度大于 30 dB,天线设计时可采用 HH、HV、VH、VV 多极化的形式,发射和接收采用 HH/VV 交叉极化,接收时将主通道正交的极化分量过滤,以此消除来自主瓣的干扰信号。某极化 SAR 系统的数字阵列模块单通道收发切换开关如图 13 所示,天线单元采用多极化天线,通过变极化发射与同时双极化接收的形式实现多极化,通过控制切换开关交替发射 H、V 极化信号,接收通道具有 H/V 双极化同时接收的能力。

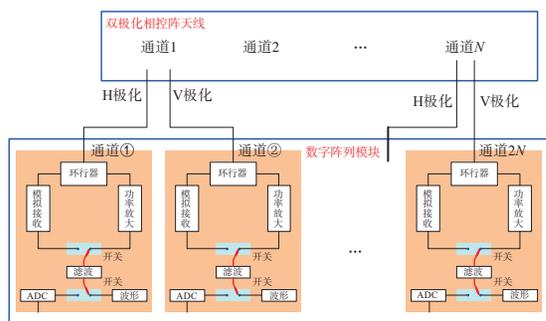
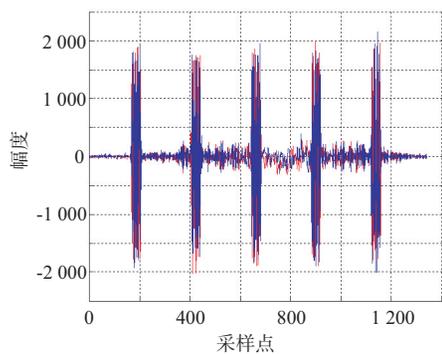
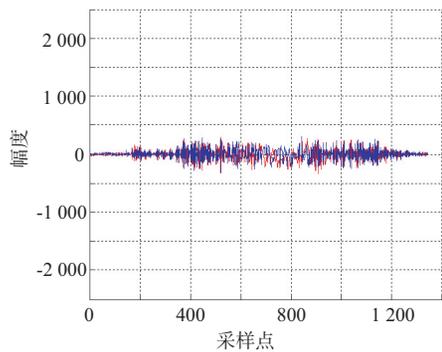


图 13 天线双极化设计示意图

为进一步说明极化方案的工程实践效果,分别验证极化方法对压制干扰和组合干扰的抑制有效性。结合某型雷达的实际飞行数据进行说明,图 14(a)给出了压制干扰的干扰效果,极化滤波处理后的结果由图 14(b)给出,比较处理前后可知,压制干扰被有效抑制。进一步地,组合干扰的干扰结果由图 15(a)给出,图 15(b)为极化滤波处理后的效果,对于组合干扰同样具有较好的抗干扰效果,且整体目标信号幅度保持较好。图 16、17 给出了极化滤波前后 SAR 和聚束 SAR 的成像结果,分析可知,极化滤波之后干扰信号降低大约 9.4 dB,目标幅度基本不变。

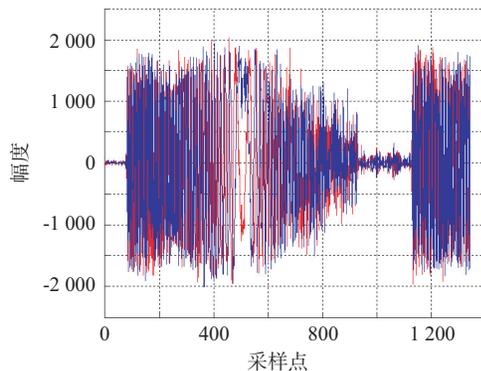


(a) 压制干扰结果

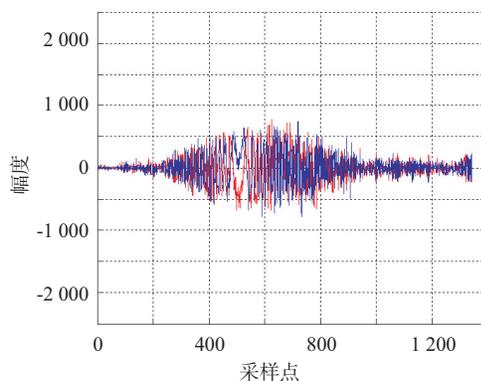


(b) 极化滤波结果

图 14 极化滤波消除压制干扰

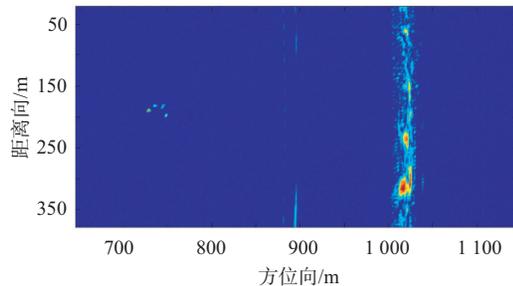


(a) 组合干扰结果

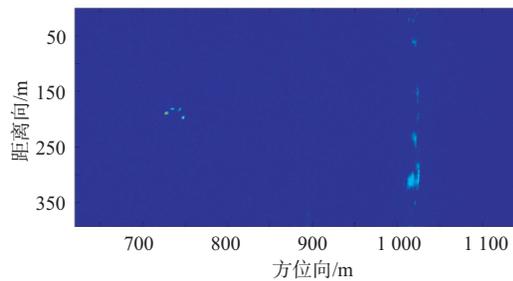


(b) 极化滤波结果

图 15 极化滤波抑制组合干扰



(a) 受干扰的 SAR 图像



(b) 极化滤波后的 SAR 图像

图 16 极化滤波前后的 SAR 幅度图

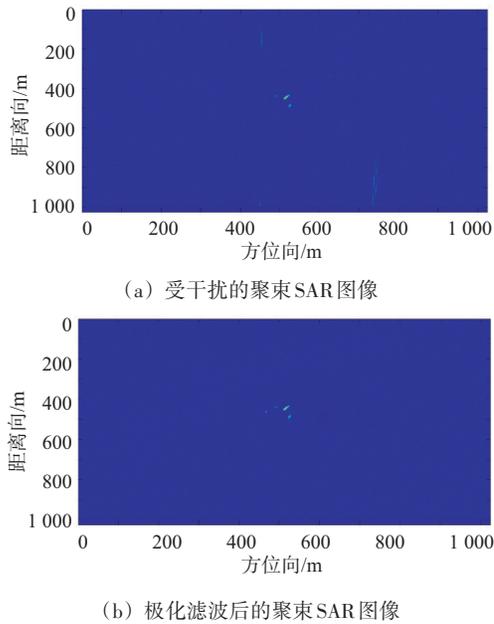


图 17 极化滤波前后的扫描聚束 SAR 幅度图

2.2.3 数据处理域算法抗干扰

对于进入系统的干扰,可采用信号处理算法滤除干扰信号影响,如通过信号成分分解与子空间投影等非参数化方法、稀疏空间重构等半参数化方法及 RELAX 及迭代自适应等参数化方法,提升 SAR 图像质量。

在信号成分分解类方法中,可以通过将信号在频域或小波域等分解为一系列分量,估计其中的频率、幅度和相位等信号参数,去除信号中的干扰^[43-44]。考虑到在单个域难以分离干扰与目标信号,可采用多域联合进行处理,如先将接收信号变换到时频域,再利用小波变换处理瞬时频率,最后保留目标信号的小波系数,达到干扰抑制的目的^[45]。本质上来说,这种通过变换抑制干扰的方式,需要在时频域或小波域中寻找目标信号与干扰信号的分解系数的差异性,如果干扰信号在相应的域内聚集性较差,方法处理结果则不会太理想。此外,通过目标信号与干扰信号在 SAR 图像域中的差异性,也可实现干扰的抑制。如利用回波与射频干扰频谱分量的差异性^[46]和目标与干扰在 SAR 图像域中统计分布的差异性等,实现干扰抑制^[47]。此外,利用独立分量分析^[48]、经验模态分解^[49-50]等方法,实现真实回波和干扰信号分离,在一定程度上同样可以达到干扰抑制的目的。在子

空间投影类方法中,首先对接收信号进行特征子空间分解,然后利用干扰特征值大于目标回波特征值这一特性,保留目标信号的特征值重构信号,实现干扰抑制^[51]。针对不同的应用场景,相关研究人员结合去斜处理与特征子空间滤波来抑制宽带噪声干扰^[52]。通过结合子空间投影和信号分解方法,也具有较好的干扰抑制效果,如先对信号进行短时傅里叶变换,然后进行奇异值分解,再用独立分量分析分离出信号中的干扰成分^[53]。此外,从稀疏重构理论的角度出发,可以将复杂的信号分离问题转换成超参数优化问题^[6,54-55],通过联合约束窄带干扰的稀疏和低秩特性,实现了计算复杂度的降低和抗干扰性能的提升^[56]。参数化方法则是通过建立干扰信号参数化模型,估计模型参数以达到去除干扰的目的,适用于抑制单一类型干扰,如渐变 RELAX 方法^[57]、迭代自适应方法^[58]及其与短时傅里叶变换和正交子空间投影的组合方法^[59]。

与上述复杂的方法不同,工程实际应用中,针对某些特定场景,结合其干扰信号特征,可采用较为简单有效的方法实现干扰抑制。如弹载系统 PRF 高,基于大面积场景的欺骗干扰很难实现,除了大功率的宽带噪声压制干扰外,有源干扰多采用转发欺骗和相干干扰等运算量小的复制型干扰。对于单接收通道雷达,在未知干扰参数(干扰强度、复制周期、方位调相、调频频率)的情况下,要提取这些干扰信号较为困难,且运算量大。

能量归一化方法即对距离压缩后的信号进行幅度归一化处理,该方法操作简单,可在信号损失不大的情况下,通过对杂波信号幅度调制实现干扰信号能量抑制,如图 18 所示。该方法主要通过干扰区信号和目标区信号的幅度归一化实现干扰抑制,处理后的干扰区信号由于方位相参性低,通过相位信息不能实现聚焦,难以获得方位积累增益。与之相比,目标区信号方位相参性高,仅通过相位信息也能实现很好的聚焦效果,积累增益较大,从而实现干扰抑制。图 19(a)和(b)分别给出了基于幅值归一化方法干扰抑制前后的 SAR 图像结果。

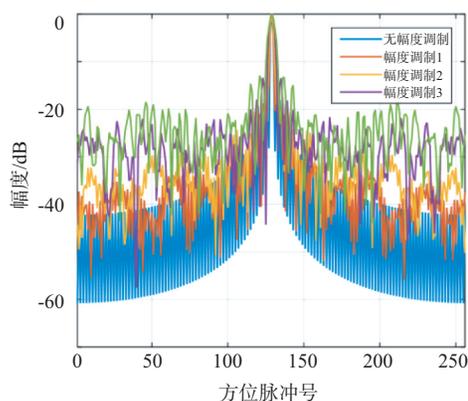
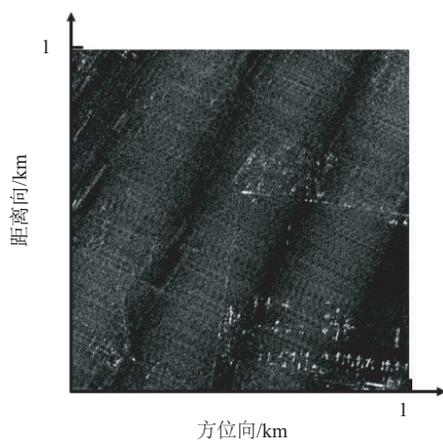
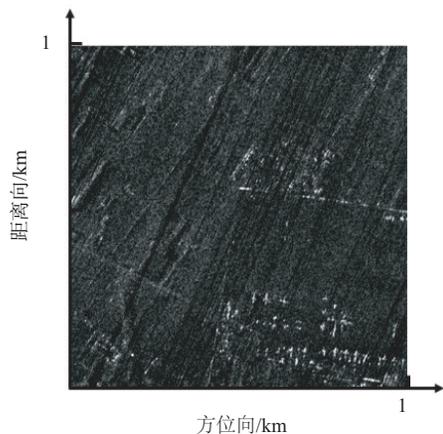


图18 单一散射点信号幅度调制前后方位谱对比



(a) 受干扰的SAR图像



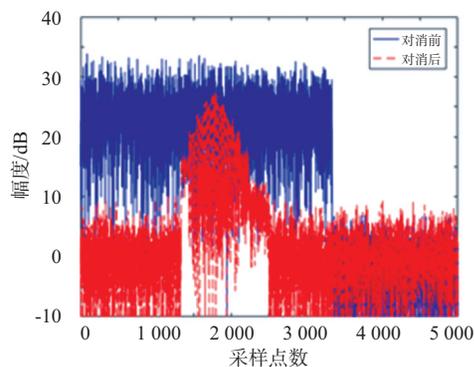
(b) 干扰抑制后的SAR图像

图19 干扰抑制前后的SAR图像

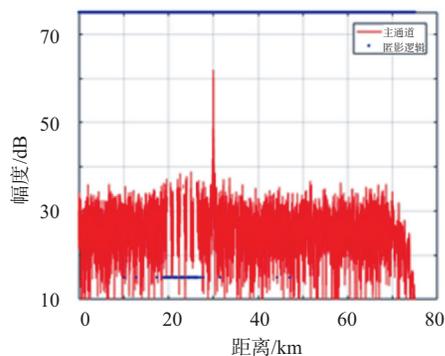
2.2.4 多域联合抗干扰

在空天基SAR正常工作过程中,面临的电磁干扰环境较为复杂,单一域的抗干扰方法具有局限性,往往采用组合抗干扰技术处理多种复合干扰^[60]。以压制干扰和密级假目标复合干扰为例,

图20(a)表示旁瓣对消结果,虽然压制式干扰成分得以有效抑制,但假目标仍然存在。图20(b)给出了复合抗干扰手段处理结果,旁瓣对消后再经过旁瓣匿影和脉冲压缩处理,压制干扰和假目标干扰均被有效抑制,显著突出了真实目标信息。



(a) 旁瓣对消处理结果



(b) 旁瓣对消+副瓣匿影+脉冲压缩

图20 不同措施的抗干扰抑制结果

以某次处于复合干扰环境的机载SAR挂飞数据为例,图21给出了同一飞行路线、不同圈次、不同抗干扰策略相应位置的飞行结果。在未采取抗干扰措施时,SAR图像质量差,无法分辨其特征,如图21(a)所示。使用部分抗干扰措施时,图像质量有一定程度提升,但是干扰仍然较为严重,SAR图像特征不明显,如图21(b)所示。与之相比,采用多域联合的抗干扰策略能够处理复杂的电磁干扰,实现复合干扰抑制,显著提升SAR图像质量,如图21(c)所示。

3 研究趋势展望

总的来说,SAR干扰是通过不同的方式破坏雷达成像,SAR抗干扰则是通过不同的技术手段

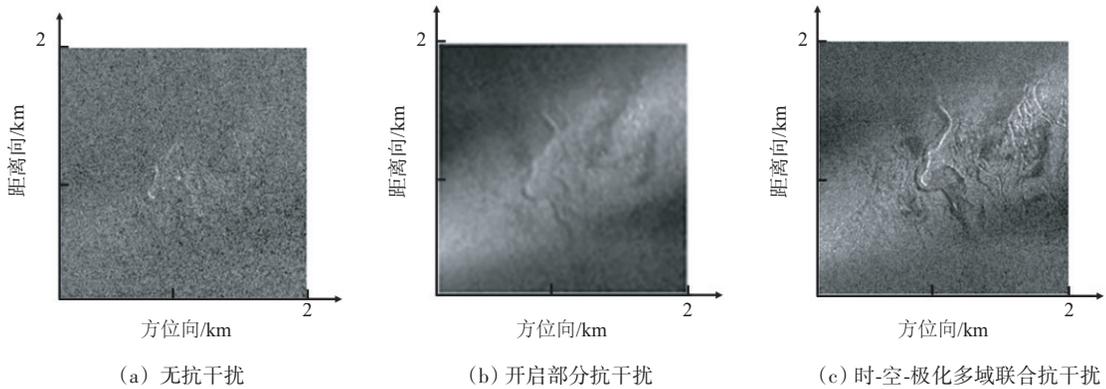


图21 不同抗干扰措施的SAR图像

避免和抑制干扰,提高成像质量。从发射角度,通过产生复杂波形和能量管控等,能够减小被敌方截获的可能性和被发现的概率。从接收角度,通过设置辅助天线、改变天线极化方式、滤波处理等策略,能够减弱干扰进入接收机或滤除接收到的干扰。基于仿真和试验结果可以看出,不同的抗干扰方法都有一定的局限性,如频率捷变手段的变化范围有限、旁瓣对消等技术难以消除所有干扰、副瓣匿影方法抑制干扰的同时也导致有用信号的丢失等。此外,对于单一类型干扰可以采用具有针对性的抗干扰方式,但对于复合干扰,常规方法的抑制能力则会显著下降。从所面临的日益复杂的电磁环境来看,如何进一步增加发射波形的复杂度提升抗截获能力,构建智能化干扰识别和抗干扰策略网络,开发新的系统体制是提升空/天基SAR抗干扰能力的关键。

1) 射频对抗波形设计由低维度向多维度发展。空/天基SAR系统为了良好的相干性,常常使用参数固定、低维调制的波形工作,面临复杂电磁环境时,雷达波形的抗截获、抗辨识和抗干扰能力不足,影响雷达探测效能。因此,面向雷达主动干扰规避能力提升的需求,需要同时从时域、频域、空域及极化域等多维度出发,设计具有强抗截获、抗辨识、抗干扰的多维射频对抗波形,提升SAR雷达的“主动对抗”能力。

2) 由单一化向多样化和智能化方向发展。从信号处理角度来说,SAR抗干扰本质是对数据进行处理,深度学习等智能方法在数据特征提取方面具有明显的优势,已在诸多领域获得了广泛应

用。目前,深度学习在抗干扰领域的应用主要集中在干扰类型的识别,如何在复杂信号多维度特征参数精细化智能认知基础上,构建具有实时性和自动化特征的抗干扰信息网络,对于最大化武器装备达到作战效能至关重要。

3) 系统体制从单站向多站协同工作发展。从系统体制来说,传统单站雷达的各种抗干扰手段均较难有效抑制主瓣干扰,多部极化不同的干扰同时存在时,会导致极化干扰抑制技术方法失效。与之相比,多站雷达通过多部小口径部署,形成等效大口径阵列,使其在干扰抑制方面具有天然优势,能够在空域有效抑制主瓣干扰,同时多部雷达协同作战,在探测方面具有较高的角度分辨率和测量精度,能够解决单部雷达资源不足的问题,且具有更强的机动部署和战场生存能力。

4 结束语

随着SAR系统性能的不不断提升,其在现代高科技战争中发挥着越来越重要的作用,是取得战争胜利不可缺少的军事装备,然而SAR在完成任务的过程中面临的电磁干扰环境十分复杂,因此研究空/天基SAR抗干扰技术对于我国土防御能力提升起到了至关重要的作用。在此背景下,本文探讨了SAR抗干扰思路和优缺点,围绕空域、时域、频域、能量域、极化域以及数据处理域等多域,结合仿真和试验数据说明了典型空/天基SAR抗干扰方法的实施效果,最后分析了未来空/天基SAR抗干扰技术的发展趋势,为相关研究人员提供参考。

参考文献:

- [1] WANG Pengbo, LIU Wei, CHEN Jie, et al. A High-Order Imaging Algorithm for High-Resolution Space Borne SAR Based on a Modified Equivalent Squint Range Model [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3):1225-1235.
- [2] 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.
- [3] ENTZMINGER J N, FOWLER C A, KENNEALLY W J. Joint STARS and GMTI: Past, Present and Future [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2):748-761.
- [4] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, et al. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013,1(1):6-43.
- [5] 陈文东,汤斌.复杂电磁环境下雷达抗干扰性能评估方法[J].雷达科学与技术,2017,15(1):73-80.
- [6] 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.
- [7] 林晓烘.星载合成孔径雷达干扰与抗干扰技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014.
- [8] 张杰,陈婉迎,吴悦.认知雷达二维自适应抗干扰捷变波形设计[J].雷达科学与技术,2019,17(4):415-420.
- [9] 蒋思源,吕幼新.基于调频率捷变的抗移频干扰SAR成像方法[J].雷达科学与技术,2015,13(6):622-626.
- [10] 柏仲干,谢虹,马孝尊,等.SAR干扰/抗干扰技术的现状与发展[J].电光与控制,2012,19(2):47-53.
- [11] 李亚超,王家东,张廷豪,等.弹载雷达成像技术发展现状与趋势[J].雷达学报,2022,11(6):943-973.
- [12] 全英汇,方文,沙明辉,等.频率捷变雷达波形对抗技术现状与展望[J].系统工程与电子技术,2021,43(11):3126-3136.
- [13] 韩朝赞,岑熙,崔嘉禾,等.纹理异常感知SAR自监督学习干扰抑制方法[J].雷达学报,2023,12(1):154-172.
- [14] 李康,纠博,赵宇,等.雷达智能博弈抗干扰技术综述与展望[J].现代雷达,2023,45(5):15-26.
- [15] 崔国龙,余显祥,魏文强,等.认知智能雷达抗干扰技术综述与展望[J].雷达学报,2022,11(6):974-1002.
- [16] 张新相,吴铁平,陈天麒.随机信号雷达抗干扰性能分析[J].电波科学学报,2008,23(1):189-194.
- [17] 冯祥芝,许小剑.混沌码正交频分复用SAR抗干扰能力研究[J].系统仿真学报,2009,21(22):7359-7362.
- [18] 张劲东,李彧晟,朱晓华.基于波形分集的雷达抗欺骗干扰[J].数据采集与处理,2010,25(2):138-142.
- [19] 谢春健,郭陈江,许家栋.调频率正负交替变化的SAR成像及抗欺骗干扰方法[J].计算机应用,2010,30(5):1383-1385.
- [20] 徐磊磊.雷达波形设计及抗主瓣有源干扰若干技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [21] 陈伯孝,张守宏.相位编码信号在稀布阵综合脉冲与孔径雷达中的应用[J].西安电子科技大学学报,1997,24(3):335-341.
- [22] 林智梅.基于相位编码信号的SAR目标成像及抗干扰性能分析[D].秦皇岛:燕山大学,2016.
- [23] 刘智星.捷变雷达抗干扰及相参处理技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [24] 张建中,穆贺强,文树梁,等.基于脉间步进LFM波形的抗间歇采样转发干扰方法[J].系统工程与电子技术,2019,41(5):1013-1020.
- [25] 崔国龙,樊涛,孔昱凯,等.机载雷达脉间波形参数伪随机跳变技术[J].雷达学报,2022,11(2):213-226.
- [26] LONG Xingwang, LI Kun, TIAN Jing, et al. Ambiguity Function Analysis of Random Frequency and PRI Agile Signals [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(1):382-396.
- [27] 李宏,薛冰,赵艳丽.雷达常见抗干扰措施的抗相参干扰性能分析[J].航天电子对抗,2018,34(1):1-4.
- [28] 张怀根,何强.机载雷达抗干扰技术现状与发展趋势[J].现代雷达,2021,43(3):1-7.
- [29] 代大海,廖斌,肖顺平,等.雷达极化信息获取与处理的研究进展[J].雷达学报,2016,5(2):143-155.
- [30] 周万幸.一种新型极化抗干扰技术研究[J].电子学报,2009,37(3):454-458.
- [31] 宋立众,乔晓林,吴群.一种基于极化DBF的制导雷达抗干扰方法[J].电波科学学报,2010,25(1):109-116.
- [32] 黄贤锋,李仙茂,袁兴华.一种超低旁瓣天线设计的研究[J].电子对抗技术,2003(2):37-40.
- [33] 柴许杨,赵志国,岳玫君,等.基于CLEAN算法的自适应旁瓣对消技术[J].雷达科学与技术,2023,21(5):526-530.
- [34] 祝飞,林强,李飞.自适应旁瓣对消技术综述[J].舰船电子对抗,2020,43(1):12-18.
- [35] O'SULLIVAN M R. A Comparison of Sidelobe Blanking Systems [C]//International Conference on Radar, London,UK: IEEE, 1987:345-349.
- [36] FARINA A, GINI F. Interference Blanking Probabilities for SLB in Correlated Gaussian Clutter Plus Noise [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000, 48(5):1481-1485.

- [37] 李友梅,高秉亚,朱新国,等.副瓣匿影优化设计研究[J].现代雷达,2022,44(7):82-87.
- [38] NATHANSON F E. Adaptive Circular Polarization [C]// IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, USA: IEEE, 1975:221-225.
- [39] POELMAN A J, GUY J R F. Multi Notch Logic-Product Polarization Suppression Filters: A Typical Design Example and Its Performance in a Rain Clutter Environment [J]. IEE Proceedings F-Communication, Radar and Signal Processing, 1984,131(4):383-396.
- [40] GHERARDELLI M, GIULI D, FOSSI M. Suboptimum Adaptive Polarization Cancellers for Dual Polarization Radars [J]. IEE Proceedings F - Communication, Radar and Signal Processing, 1988,135(1): 60-72.
- [41] 施龙飞,任博,马佳智,等.雷达极化抗干扰技术进展[J].现代雷达,2016,38(4):1-7.
- [42] 张国毅,刘永坦.高频地波雷达多干扰的极化抑制[J].电子学报,2001,29(9):1206-1209.
- [43] 毛兴鹏,刘永坦,邓维波.频域零相移多凹口极化滤波器[J].电子学报,2008,36(3):537-542.
- [44] LORD R T, INGG S M R. Efficient RFI Suppression in SAR Using LMS Adaptive Filter Integrated with Range/Doppler Algorithm [J]. Electronics Letters, 1999,35(8): 629-630.
- [45] HUANG Xiaotao, Liang Diannong. Gradual RELAX Algorithm for RFI Suppression in UWB-SAR [J]. Electronics Letters, 1999,35(22):1916-1917.
- [46] ZHANG Shuangxi, XING Mengdao, GUO Rui, et al. Interference Suppression Algorithm for SAR Based on Time-Frequency Transform [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2011,49(10):3765-3779.
- [47] FENG Jin, ZHENG Huifang, DENG Yunkai, et al. Application of Subband Spectral Cancellation for SAR Narrow-Band Interference Suppression [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012,9(2):190-193.
- [48] ZHOU Feng, SUN Guangcai, BAI Xueru, et al. A Novel Method for Adaptive SAR Barrage Jamming Suppression [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012,9(2):292-296.
- [49] ZHOU Feng, TAO Mingliang, BAI Xueru, et al. Narrow-Band Interference Suppression for SAR Based on Independent Component Analysis [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2013,51(10):4952-4960.
- [50] ZHOU Feng, XING Mengdao, BAI Xueru, et al. Narrow-Band Interference Suppression for SAR Based on Complex Empirical Mode Decomposition [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009,6(3):423-427.
- [51] HUANG N E, SHEN Zheng, LONG S, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis [J]. Proceedings of Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [52] ZHOU Feng, WU Renbiao, XING Mengdao, et al. Eigen Subspace -Based Filtering with Application in Narrow-Band Interference Suppression for SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007,4(1):75-79.
- [53] 阮航,叶伟,尹灿斌,等.一种SAR宽带噪声干扰抑制的新方法[J].现代防御技术,2010,38(6):151-155.
- [54] TAO Mingliang, ZHOU Feng, LIU Jiangqian, et al. Narrow-Band Interference Mitigation for SAR Using Independent Subspace Analysis [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2014,52(9):5289-5301.
- [55] NGUYEN L H, TRAN T, DO T. Sparse Models and Sparse Recovery for Ultra-Wideband SAR Applications [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2):940-958.
- [56] HUANG Yan, LIAO Guisheng, LI Jie, et al. Narrowband RFI Suppression for SAR System via Fast Implementation of Joint Sparsity and Low-Rank Property [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(5): 2748-2761.
- [57] 黄晓涛,梁甸农.基于RELAX的UWB-SAR抑制RFI算法[J].国防科技大学学报,2000,22(2):55-59.
- [58] LIU Zhilin, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei. Time Variant RFI Suppression for SAR Using Iterative Adaptive Approach [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6):1424-1428.
- [59] YANG Zhiwei, DU Wentao, LIU Zhilin, et al. WBI Suppression for SAR Using Iterative Adaptive Method [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(3):1008-1014.
- [60] 赵国林,韩俊.相控阵雷达混合干扰策略研究[J].雷达科学与技术,2014,12(4):363-367.

作者简介:

江凯男,正高级工程师,主要研究方向为雷达系统总体、雷达信号处理。