

引用格式: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. ZHANG Y P, BI D P, FANG M X, et al. An overview on multi-channel SAR and its ECM technique[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(11):58-63.

多通道 SAR 及其干扰技术研究现状

张云鹏, 毕大平, 房明星, 沈爱国, 周 阳
(电子工程学院,合肥 230037)

摘要:从 InSAR, SAR-GMTI 和双/多通道对消技术 3 个方面介绍了多通道 SAR 的发展历程,总结了其抗干扰技术的研究进展,并着重总结分析了多通道 SAR 干扰技术的发展现状。抗干扰方面,主要从天线及体制、信号波形两个角度进行了归纳,并分析了双/多通道干扰对消技术的特点。干扰方面,分析了多通道 SAR 干扰技术的发展趋势,重点探讨了复杂调制、相干性、多站分布式干扰和针对多通道 SAR 抗干扰技术等问题。

关键词:多通道合成孔径雷达;地面动目标显示;双通道干扰对消;波形捷变;干扰技术

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.11.012

An Overview on Multi-channel SAR and Its ECM Technique

ZHANG Yun-peng, BI Da-ping, FANG Ming-xing, SHEN Ai-guo, ZHOU Yang
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: The historical development of multi-channel Synthetic Aperture Radar (SAR) system is presented from three aspects of InSAR, SAR-GMTI and dual-/multi-channel cancellation technique, and the research progress of Electronic Counter-Countermeasure (ECCM) is summarized with focus on the status quo of multi-channel SAR ECM technique. With regard to multi-channel SAR ECCM, an introduction is made from two aspects: antenna/structure and signal waveform, and the characteristics of dual-/multi-channel cancellation technique are analyzed. As to multi-channel SAR ECM, the prospect of ECM is analyzed emphatically, and emphases are laid on the complexity of modulation, the coherency of interference, the multi-station distributed countermeasure and the multi-channel SAR ECCM.

Key words: multi-channel SAR; Ground Moving Target Indication (GMTI); dual-channel cancellation; waveform agility; jamming technique

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是 20 世纪雷达技术最重要的进展,它主要利用距离向脉冲压缩技术和方位向孔径合成方式实现观测区域的二维成像,并具有全天时、全天候、高处理增益和远距离观测等优势。由于传统成像雷达的工作体制和成像模式无法满足更高分辨率、动目标检测、三维成像和杂波抑制等需求,新体制成像理论和方法的研究越来越受到重视。在发展过程中,多通道 SAR 技术的产生和完善使得成像雷达的信息获取能力和抗干扰能力获得极大提升。

多通道 SAR 具有更高的系统自由度,可以从雷达

回波的相位中获取比单通道 SAR 更多的有用信息,现阶段较为成熟且应用最为广泛的多通道技术主要包括干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术、合成孔径雷达地面动目标显示(Synthetic Aperture Radar-Ground Moving Target Indication, SAR-GMTI)技术、双/多通道对消(Dual-/Multi-channel Cancellation)技术和高分辨宽测绘带(High-Resolution and Wide-Swath, HRWS)技术等。InSAR 是多通道 SAR 中发展较为成熟的三维成像体制雷达,能够获取热点区域的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和三维信息;SAR-GMTI 结合了 GMTI 的运动目标检测和 SAR 高分辨成像的功能,可以实时对地面动目标进行检测、识别、定位、跟踪和成像^[1];双/多通道对消技术利用通道间接收信号的相位关系可有效地抑制干扰信号^[2];HRWS 模式利用空域维度信息进行高分辨成像处理。

国外多通道 SAR 技术的发展和性能的持续提升

收稿日期:2016-11-23

修回日期:2017-01-13

作者简介:张云鹏(1992—),男,山东枣庄人,硕士生,研究方向为 SAR 信号处理及 SAR 对抗理论。

给我国的战略部署和军事保密带来严峻挑战: SAR-GMTI, InSAR 等对我军装甲车、舰船等重要军事目标和作战地形等构成了严重威胁; 双/多通道对消、波形捷变等抗干扰技术的应用更使得一些传统的相干干扰方法失去效用。因此, 针对多通道 SAR 的干扰技术研究具有重要的现实意义。本文首先介绍了多通道 SAR 的发展历程, 并对其抗干扰技术进行了分类总结, 最后对干扰技术的研究现状和发展趋势进行了分析, 重点强调了干扰技术在调制复杂度、相干性、多站干扰以及克服抗干扰技术等方面的需要。

1 多通道 SAR 技术的发展历程

多通道 SAR 的研制与工程实践主要集中于 20 世纪 90 年代, 2000 年后基本进入成熟发展期。目前备受各国重视的星载 SAR 系统基本都具备多通道工作模式, 其开发周期较长, 有的至今仍处于研发和升级阶段, 以下主要结合各国典型的多通道 SAR 系统, 介绍 InSAR, SAR-GMTI 等多通道技术的发展。

1.1 InSAR 技术

GRAHAM 于 1974 年首次提出干涉方法处理 SAR 图像的设计, 并利用机载 InSAR 获取地面精度较低的高程信息。1986 年, ZEBKER 等人在利用机载 InSAR 对金门大桥附近地区进行观测, 并获取了精度 2~10 m 的高程图。1988 年, GOLDSTEIN 等人利用 SIR 和 SEASAT-SAR 的成像数据进行干涉处理成像, 已能够获取与出版地图非常接近的结果。加拿大于 1995 年发射了工作于 C 波段的 Radarsat-1, 它是第一个实用化 ScanSAR 模式星载 SAR 系统^[3]。欧空局于 1991 年发射的 ERS-1 和 1992 年发射的 ERS-2 组成单发单收多航过 InSAR 系统; 1994 年发射了 SIR-C/X-SAR 卫星, 使用 L, C 和 X 多个波段, 为干涉 SAR 提供了更多高质量的数据; 2002 年发射 ENVISAT 对地探测卫星, 搭载 ERS-1/2 的改进型 ASAR 系统, 并用于地球表面的观测。

德国于 2010 年发射的 TanDEM-X (TDX) 和 2008 年发射的 TerraSAR-X (TSX) 均采用 HELIX 编队飞行, 能提供绝对误差在 4 m 的全球高程图^[4], 参见图 1。

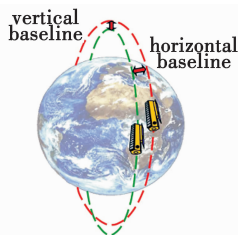


图 1 TanDEM-X 双螺旋卫星编队

Fig. 1 HELIX satellite formation for TanDEM-X

NASA 于 2003 年首次提出的 GESS 系统可提供实

时、高精度的全球范围地壳形变监测, 该系统在 2013 年实现 2~3 颗低轨卫星组成的 InSAR 星座, 计划到 2018 年实现中、高轨 InSAR 系统的演示验证。由 NASA, DLR 和 JPL 共同提出的 TanDEM-L 就是 GESS 系统进程的第一阶段^[5], 其分辨率为 20.50 m, 高程精度可达 2.4 m。

1.2 SAR-GMTI 技术

美国最早在 20 世纪 70 年代就已经开始单通道 SAR-GMTI 的研究工作。1991 年, 将具有 GMTI 功能的联合监视和目标攻击雷达系统 (Joint Surveillance and Target Attack Radar System, JointSTARS) 装备于两架 E-8 飞机上, 在海湾战争用于战场侦察, 标志着 SAR-GMTI 进入实战应用阶段^[1]。作为 JointSTARS 计划的升级, 2000 年年底开始了多平台雷达技术改进计划 (MP-RTIP), 采用模块化的有源电扫相控阵天线雷达系统, 重大改进是可以同时获得 SAR 静止图像和地面运动目标显示图像而且分辨率大幅提升。图 2 为 SAR/GMTI 组合成像。

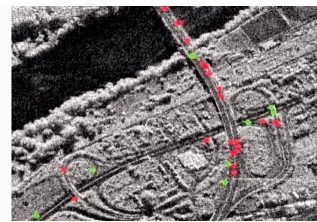


图 2 SAR/GMTI 组合成像

Fig. 2 SAR/GMTI combined imaging

加拿大于 1999 年在 Petawawa 军事基地进行了机载试验, 对相位中心偏置天线 (DPCA)^[6-7] 和沿航迹干涉 (ATI)^[8] 这两种测量方法进行了测试, 并开始了星载 SAR-GMTI 系统的研究: 2007 年发射的 Radarsat-2 已具备多种成像模式^[9]; 2008 年进行了为期两年的运动目标检测实验 (MODEX: Moving Object Detection Experiment) 科研计划, 以开发、验证用于观测、检测和监视地面车辆的试验性星载地面运动目标显示模式^[10]。

德国在 SAR-GMTI 研发上晚于美国, 机载 X 波段多通道 SAR 实验系统 AER 于 1995 年和 1996 年分别进行了车载和机载试验, 该系统已具备全极化、聚束、干涉测量和 SAR/MTI 等工作模式; 之后 FGAN 研制的多功能相控阵成像雷达 (PAMIR) 系统获得了比 AER 更高的分辨率和更宽的角域范围, 工作模式更加多样^[11]; 2008 年初由德国宇航中心主导发射的 TerraSAR-X 卫星具备 GMTI 功能, 基本可应用于交通管制, 并且它与之后发射的 TanDEM-X 组成了编队卫星 SAR-GMTI 系统雏形^[4,12]。TanDEM-X 是典型的分布式 SAR-GMTI 系统, 分布式卫星具有更好的系统自由度, 卫星编队方式能够突破单星体制下基线长度受限

的问题,进一步提高慢速目标的检测性能。目前,其他正在发展的分布式星载 SAR-GMTI 系统有法国的干涉车轮 Cartwheel 系统^[13]、美国的 TechSat-21^[14]和意大利的 COSMO-SkyMed 系统^[15]等。表 1 为国外典型多通道 SAR 系统,未注明年份的为正处于研发升级中。

表 1 国外典型多通道 SAR 系统

Table 1 Typical foreign multi-channel SAR system

国家	名称(年份)
美国	SEASAT-SAR(1988 年), JointSTARS(1991 年), MP-RTIP(2000 年), TechSat-21
加拿大	RADARSAT-1(1995 年), RADARSAT-2/3(2007 年)
欧空局	ERS-1/2(1991 年/1992 年), ENVISAT(2002 年)
德国	AER(1995 年), PAMIR(1996 年), TerraSAR-X(2007 年), TanDEM-X(2009 年), TanDEM-L
意大利	COSMO-SkyMed(2007 年)
法国	Cartwheel

1.3 双/多通道对消技术

多通道 SAR-GMTI 和 InSAR 系统均可以利用双/多通道对消技术获取干扰被抑制的静止区域 SAR 图像,该技术是实现多通道抗干扰的重要方法^[16]。双/多通道对消技术利用固定干扰机发射的干扰信号到各通道的相位差可量化的特性,通过估计该相位差和相位补偿来实现通道间的干扰对消。干涉相位的估计是难点,并且部分地物信息会被周期性对消掉,因而多通道对消成像结果是受到一定影响的。但相对于受干扰的 SAR 图像,这些影响是可以忽略的,并且随着技术改进,这些问题也在逐渐被克服^[17]。

2 多通道 SAR 抗干扰技术的研究进展

2.1 天线及体制方面

多通道 SAR 天线/系统体制方面的抗干扰技术可分为空域抗干扰和双/多通道对消技术两类。

空域抗干扰技术本质上是基于阵列波束形成技术,ENDER 较早地提出一种基于 SAR 图像重建的空间-慢时间空时自适应处理(STAP)抗干扰方法,研究结果显示该方法优于单纯的空间滤波结果,但只对压制性干扰进行了分析。文献[18]提出分别采用空间-慢时间和空间-快时间的 STAP 技术抑制直达波干扰和弹射式干扰。文献[19]针对多通道 SAR 提出了一种基于空-频自适应调零的宽带天线调零抗干扰方法。国内的文献[20-21]也对空域抗干扰技术进行了研究,进一步完善了 STAP 干扰抑制技术。空域抗干扰技术出现较早,发展较为成熟,但要求的运算量较大,对干扰类型的区分度高,而且一般会在干扰向形成波束缺口,对成像的影响较大。

双/多通道对消技术利用通道间接收脉冲信号的相位关系对消定点干扰源信号,是一种直接有效的多

通道抗干扰方法。该方法最初是针对散射波干扰:文献[16]分析了采用双天线对消弹射式干扰的方法,结合散射波干扰模型从理论上分析双路对消的原理,给出了对消条件;为解决文献[16]中的补偿相位估计难题,文献[22]依据两路对消后能量最小准则提出了自动相位搜索算法。之后的研究逐渐将多路对消的思想用于对抗噪声压制性干扰:文献[2]提出了利用双通道对消抑制点源噪声干扰,并分析了该方法会造成周期性回波损失,仿真成像在方位向形成了周期性暗条纹;文献[23]推导了干扰对消中损失周期的表达式;文献[17]提出了抑制 SAR 压制性干扰的三通道对消方法,该方法下回波损失周期更大,从而有效改进了成像效果,同时推广讨论了 N 通道对消的情况。在针对欺骗式干扰方面:文献[24]研究了利用双天线检测 SAR 欺骗干扰的方法;文献[25]通过比较分析欺骗式干扰与场景回波的异同,利用场景回波多普勒谱具有固定相位差的特性来构造通道的导向矢量,进而抑制欺骗式干扰。相比于空域抗干扰技术,双/多通道对消具有以下特点:1) 运算量较小,阵元数量需求少,双通道即可实现对消;2) 对干扰类型的区分要求低,能适应多种干扰类型,对散射波干扰也有较好的抑制效果^[21];3) 一般作用于单点源干扰,且会造成周期性的回波损失^[2]。

2.2 信号波形方面

SAR 采用波形捷变技术可实现对干扰的抑制,最常使用的方式是调频率捷变,并经历了调频率微调、极性捷变、随机捷变的发展历程。SOUMEKH 等人率先对线性调频体制 SAR 展开波形捷变抗干扰研究,首先提出了慢时刻微调信号幅度的方法,该方法抗干扰效果较弱;之后研究了脉间调频率微调的抗干扰方法^[26],该方法在获得抗干扰增益的同时在一定程度上影响了成像结果。为获得更好的成像效果,初相调节、限幅陷波等与调频率捷变相结合的复合抗干扰方法也相继提出:文献[27]在 SOUMEKH 的基础上提出调频率极性捷变和限幅结合的抗干扰方法,实验证明极性捷变的抗干扰效果要好于调频率微调;文献[28]研究了随机初相结合调频斜率极性捷变的抗干扰方法,随机初相可有效降低干扰的方位向增益;文献[29]提出随机线性调频率抗欺骗干扰方法,并结合一维、二维干扰陷波给出了算法流程和影响抗干扰的因素,证明二维陷波具有更好的抗干扰性能,但运算量较大;文献[30]提出参数捷变工作模式,利用脉冲重复频率的变化回避发射脉冲干扰的遮挡,有效拓展了 SAR 的测绘带宽度。信号捷变方法作为信号波形层面的抗干扰手段,能进一步增强多通道 SAR 的干扰抑制性能。

3 多通道 SAR 干扰技术的研究现状

出于保密原因,国外关于多通道 SAR 干扰技术的公开文献极少,国内的相关研究快速发展于 2005 年以后。

3.1 对 InSAR 的干扰研究

针对 InSAR 的干扰研究可分为两类。一类是探究噪声、散射波等传统干扰样式对高程恢复、图像配准等 InSAR 处理流程的影响:文献[31]提出常规 SAR 干扰如噪声干扰、欺骗干扰均能够影响 InSAR 相位解缠的性能,从而降低高程反演的精度;文献[32]研究了散射波干扰对 InSAR 的干扰效果,结果表明散射波干扰对 InSAR 有较好的欺骗效果,能有效破坏原地形的特征;文献[33]分析了欺骗干扰对 InSAR 复图像配准的影响,验证了在干信比增加条件下,间歇转发干扰将使得 InSAR 干涉条纹图变差。

另一类干扰研究主要针对 InSAR 高程反演,旨在实现可控的三维欺骗干扰效果:文献[34]在 2007 年首次提出了对 InSAR 的三维欺骗干扰方法,指出需要合理配置多台干扰机;文献[35]研究了由固定单干扰机生成的二维相干调制干扰的干涉相位、相干性以及 InSAR 高程反演结果,由于干扰的干涉相位固定,在 InSAR 处理后表现出斜坡效应,斜坡的坡度为 InSAR 基线倾角的补角;文献[36]之后提出了基于双天线幅相控制的 InSAR 干扰方法来削弱斜坡效应;文献[37]提出一种基于双干扰机协同的 InSAR 三维虚假场景生成方法,能够在不同自然场景中形成起伏特性可控的虚假三维场景。

3.2 对 SAR-GMTI 的干扰研究

3.2.1 遮蔽式干扰

相比于传统的噪声压制干扰,遮蔽式干扰的相干性相对较好,主要是利用目标微动、干扰信号的二维移频等方法来破坏聚焦,以实现区域性的压制干扰效果。文献[38]提出了一种基于旋转角反射器的无源压制干扰方法,分析了旋转角反射器的信号模型在各通道中的信号特性,并研究了该方法在 GMTI 对消成像中形成干扰遮蔽条带的原因;文献[39]指出在干扰机附近,散射波干扰信号经 DPCA 处理后会失效,而随机延迟散射波干扰则可以生成距离向滞后于干扰机的压制干扰效果;文献[37]研究了复杂间歇采样转发干扰和随机分段排序转发干扰,可在方位向形成条状遮蔽干扰效果;文献[40]将方位向匀加速运动调制和距离向余弦调相结合,在成像中形成区域遮蔽干扰效果,遮蔽区域可通过改变干扰参数进行控制。

3.2.2 虚假运动目标干扰

对于 SAR-GMTI 来说,欺骗干扰的有效性在于生成

逼真的虚假运动目标,从而混淆和保护己方重点运动目标。现有研究中虚假运动目标干扰的实现方法较多,包括特殊延时转发、多普勒运动调制、散射波、余弦调相等。文献[41]最早开始对虚假运动目标的生成进行研究,对干扰机截获的信号进行一定的延迟,使得时延与运动目标的时延相同,再配合调制相应的散射系数转发,从而在动目标成像中形成多个虚假运动目标;文献[42]在截获信号脉冲的频域内进行调制来生成与运动目标回波相同的信号形式,并讨论了其干扰效果与 SAR 工作载频和运行速度等参数的估计误差之间的关系;文献[43]分析了不同运动状态目标的成像特性,通过对干扰机截获的 SAR 信号附加多普勒相位实现运动调制,提出了 SAR-GMTI 微动、匀速与匀加速虚假运动目标干扰调制方法,并分析了侦察误差对干扰效果的影响;文献[44]分析了散射波干扰对多通道 SAR-GMTI 的对抗性能,研究表明散射波干扰具有假目标干扰效果,且幅度受正弦调制系数影响出现增强区和削弱区。

为进一步增加雷达信号处理和虚假运动目标识别的难度,干扰逐渐由单点假目标向二维多点、虚假场景发展,干扰的工程实现方法也更加多样。文献[45]提出一种匀速虚假运动场景信号的快速生成方法,能将静止虚假场景信号快速转换为匀速运动的干扰信号;文献[37]提出一种基于双干扰机协同的虚假运动目标生成方法;文献[46]提出在距离向余弦调相的同时,利用旋转干扰天线实现方位向余弦调相,解决了方位向余弦调相的工程实现难题,该方法对 SAR 和 SAR-GMTI 均可产生二维“网状”多假目标干扰效果。

3.3 针对抗干扰技术的干扰研究

目前,在对抗双/多通道对消技术和对抗波形捷变技术的干扰研究相对较少:文献[47]研究了运动干扰机对方位多通道 SAR 的影响,针对的是采用零点陷波消除干扰的空域抗干扰方式;文献[48]提出利用双干扰机对抗双通道对消的方法,给出了双干扰机的干涉相位条件,但只研究了压制性干扰效果;文献[49-50]研究了间歇采样快/慢时间调制干扰和间歇采样散射波干扰对调频斜率抖动 SAR 的干扰效果;文献[51]针对调频率捷变 SAR 信号的方位向特点,将方位向多普勒移频和方位向间歇采样相结合,建立了干扰应用模型,该方法可产生多组假目标对重要区域进行保护。

4 多通道 SAR 干扰技术的发展趋势

多通道 SAR 能充分挖掘相位的潜藏信息,实现运动目标检测等特殊功能,多个通道也使其在干扰抑制方面具有先天的体制优势,同时波形捷变等技术可以进一步增强抗干扰能力,这些都对传统干扰方法形成了

挑战。从本文对研究现状的总结分析来看,多通道 SAR 干扰技术的发展趋势有以下几个方面:

1) 由单一的干扰样式逐渐向复合复杂调制干扰过渡^[37,43],干扰的战场适应性逐渐增强。任一种实现方式单一的干扰样式都具有自身缺陷和局限性,将多种干扰方式复合并行,能够提高敌方侦察识别和消除干扰的难度,大幅提升对抗能力。开展适应性和干扰能力更强的复合干扰研究,能有效增强对抗装备的生存能力和作战效能。

2) 由非相干干扰向假目标欺骗、区域遮蔽等相干干扰样式过渡^[40-44]。相比于噪声压制干扰,相干干扰所需的干扰能量小,干扰效率较高。多假目标欺骗能有效掩护混淆己方真实机动目标和重要军事部署,欺骗性假目标的可控性、逼真度成为研究重点与难点^[46];遮蔽式干扰能在二维成像中形成区域性压制,用以掩护重要军事目标,在能量利用率和压制效果方面均有所提升^[40]。

3) 利用多干扰机协同对抗多通道 SAR^[37,48]。多天线或多干扰机为干扰的实现增添了体制上的优势,可有效破坏到达各通道干扰信号的一致性,从而提高 SAR 从相位中提取信息的难度。结合多通道 SAR 的功能特点,对干扰机的部署、运动以及分时工作展开研究,是实现多通道 SAR 快速高效干扰的重要方向。

4) 干扰技术的发展将更加着眼于克服多通道 SAR 的抗干扰能力,空域抗干扰、多通道对消^[16]以及波形捷变等^[27]抗干扰技术的日趋成熟,在一定程度上引导了多通道 SAR 干扰技术的发展方向,针对各类抗干扰技术的干扰方法将成为研究重点。

5 结束语

本文总结介绍了多通道 SAR 及其抗干扰技术、多通道 SAR 干扰技术的发展历程和研究现状,并分析指出了干扰技术的发展趋势。多通道 SAR 干扰技术的发展需要突出对地面机动目标、作战地形和战术部署的重点保护,并能够重点针对多通道 SAR 的功能特点、信号处理流程及其抗干扰技术进行有效对抗,同时需要在干扰的复杂度、相干性、多机协同方法等多个方面进行针对性更强的干扰技术研究。

参 考 文 献

- [1] ENTZMINGER J N, FOWLER C A, KENNEALLY W J. JointSTARS and GMTI: past, present and future[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2):748-761.
- [2] 马永华,王建国,徐三元. 一种双通道合成孔径雷达抗干扰方法[J]. 信号处理,2003,19(s1):359-362.
- [3] FORSTER R R, JEZEK K C, SOHN H G, et al. Analysis of glacier flow dynamics from preliminary RADARSAT InSAR data of the antarctic mapping mission[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, IEEE, 1998:2225-2227.
- [4] PITZ W, MILLER D. The TerraSAR-X satellite[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2):615-622.
- [5] KRIEGER G, HAJNSEK I, PAPATHANASSIOU K, et al. The TanDEM-L mission proposal: monitoring earth's dynamics with high resolution SAR interferometry[C]//Radar Conference, Pasadena;IEEE, 2009:1-6.
- [6] DAWIDOWICZ B, KULPA K S, MALANOWSKI M, et al. DPCA detection of moving targets in airborne passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2):1347-1357.
- [7] 王肖洋,高贵,周石琳,等. 一种基于双通道 DPCA 的 SAR-GMTI 杂波抑制方法[J]. 雷达学报,2014,3(2):241-248.
- [8] CHEN C W. Performance assessment of along-track interferometry for detecting ground moving targets[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2004:99-104.
- [9] SHEN C. An analysis of RADARSAT2 SAR-GMTI performance for standard beam mode[R]. Technical Report TR 2000-088, Defence Research Establishment, Ottawa, 2000.
- [10] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I, GIERULL C H. Optimum SAR/GMTI processing and its application to the radar satellite RADARSAT-2 for traffic monitoring[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10):3868-3881.
- [11] ENDER J H G, BERENS P, BRENNER A R, et al. Multi-channel SAR/MTI system development at FGAN: from AER to PAMIR[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Los Angeles, 2002:1697-1701.
- [12] SUCHANDT S, RUNGE H, BREIT H, et al. Automatic extraction of traffic flows using TerraSAR-X along-track interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2):807-819.
- [13] MASSONNET D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3):506-520.
- [14] ZETOCHA P. A backroom mission operations center for TechSat21[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002:3189-3193.
- [15] LOMBARO P. A multi-channel spaceborne radar for the COSMO-SkyMed satellite constellation[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004:111-119.

- [16] 甘荣兵, 王建国, 何川. 双路对消抑制对合成孔径雷达的弹射式干扰[J]. 信号处理, 2005, 21(1): 27-30.
- [17] 马晓岩, 秦江敏, 贺照辉, 等. 抑制 SAR 压制性干扰的三通道对消方法[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1015-1020.
- [18] ROSENBERG L, GRAY D. Anti-jamming techniques for multichannel SAR imaging [J]. IEE Proceeding Radar Sonar Navigation, 2006, 153(3): 234-242.
- [19] BUCCIARELLI M, CRISTALLINI D, PASTINA D, et al. Integrated wideband antenna nulling and focusing technique for multi-channel synthetic aperture radar [C]// International Radar Symposium, 2008: 1-4.
- [20] 李伟, 梁甸农, 董臻. 一种分布式小卫星 SAR 系统空/频抗干扰技术[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 469-473.
- [21] 于春锐. 合成孔径雷达有源干扰抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [22] 甘荣兵, 王建国, 何川. 双天线对消弹射式干扰中的相位估计[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1691-1693.
- [23] 王爱军, 褚建祥, 王平, 等. 双通道对消方法抑制 SAR 干扰对目标的影响分析[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(1): 35-39.
- [24] 李晨, 朱岱寅. 利用双天线干涉检测针对 SAR 的欺骗干扰[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1412-1415.
- [25] 张双喜, 孙光才, 刘艳阳, 等. 基于四通道 SAR 欺骗式干扰抑制算法[J]. 现代雷达, 2011, 33(2): 22-26.
- [26] SOUMEKH M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2006, 42(1): 191-205.
- [27] 李伟, 梁甸农, 董臻. 一种捷变调频斜率极性和限幅相结合的 SAR 抗干扰方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 171-176.
- [28] 董臻, 李伟, 梁甸农. 基于发射信号随机初相结合调频斜率极性的捷变的 SAR 抗干扰方法[J]. 信号处理, 2008, 24(3): 487-490.
- [29] 冯祥芝, 许小剑. 随机线性调频斜率 SAR 抗欺骗干扰方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 69-73.
- [30] GERBERT N, KRIEGER G. Ultra-wide swath SAR imaging with continuous PRF variation [C]// Proceeding of The European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, 2010: 966-969.
- [31] 张光义. 合成孔径雷达的电子对抗措施[J]. 现代雷达, 2008, 30(7): 1-9.
- [32] 贾丽, 贾鑫, 何永华, 等. 弹射式干扰对 InSAR 成像的影响分析[J]. 电子信息对抗技术, 2012, 27(3): 42-48.
- [33] 贾丽, 贾鑫, 胡华超. 欺骗干扰对 InSAR 复图像配准的影响分析[J]. 信号处理, 2012, 28(10): 1394-1401.
- [34] 唐波, 郭琨毅, 王建萍. 合成孔径雷达三维有源欺骗干扰[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1203-1206.
- [35] LIU Q F, XING S Q, WANG X S, et al. The "slope" effect of coherent transponder in InSAR DEM [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 127: 351-370.
- [36] 刘庆富. 对 SAR/InSAR 侦察和干扰方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [37] 张静克. 对多通道 SAR 分布式协同干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [38] 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.
- [39] HUANG L, DONG C X, SHEN Z B, et al. The influence of rebound jamming on SAR-GMTI [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(2): 399-403.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 徐少坤, 李亚楠, 付耀文. 欺骗式动目标 SAR 干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(7): 94-98.
- [43] 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.
- [44] 房明星, 毕大平, 沈爱国. 散射波干扰对多通道 SAR-GMTI 的对抗性能分析[J]. 现代雷达, 2016, 38(8): 88-93.
- [45] 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.
- [46] 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): 1766-1772.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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): 2456-2762.
- [50] 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.
- [51] 房明星, 毕大平, 沈爱国. SAR 多普勒移频间歇采样转发干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2287-2295.