

MIMO-SAR 技术发展概况及应用浅析

周伟^{*①} 刘永祥^① 黎湘^① 凌永顺^②

^①(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(电子工程学院 合肥 230037)

摘要: 多发多收合成孔径雷达(MIMO-SAR)是近年来提出并备受关注的一种新型雷达成像模式, 通过多天线同时发射、多天线同时接收的工作方式能够获得远多于实际天线数目的等效观测通道, 为解决常规 SAR 面临的方位向高分辨率与宽测绘带指标相互矛盾、弱小慢速运动目标难以检测等难题提供了更为有效的技术途径。该文围绕 MIMO-SAR 成像技术及其应用展开论述, 从距离分辨率增强、3 维下视成像、高分辨率宽测绘带成像以及动目标检测等方面综述了 MIMO-SAR 的研究状况, 分析了系统的体制优势和不足, 进而归纳了 MIMO-SAR 研究中的若干关键技术问题, 最后对其应用前景进行了展望。

关键词: 合成孔径雷达; MIMO 雷达; 高分辨率宽测绘带(HRWS)成像; 运动目标检测(GMTI)

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)01-0010-09

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13074

Brief Analysis on the Development and Application of Multi-Input Multi-Output Synthetic Aperture Radar

Zhou Wei^① Liu Yong-xiang^① Li Xiang^① Ling Yong-shun^②

^①(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Recently, a novel conception of Synthetic Aperture Radar (SAR) based on Multi-Input Multi-Output (MIMO) technology draws much attention for its potential advantages. MIMO-SAR could obtain much more equivalent channels than the number of the physical array elements by simultaneously utilizing multiple antennas at transmission and reception. These additional channels are demonstrated to be useful for the application of High-Resolution Wide-Swath (HRWS) imaging and slowly moving target indication. In this paper, a detailed discussion on the conception and connotation of MIMO-SAR is made firstly, and then the investigation states of MIMO-SAR, such as high range resolution SAR imaging, three-dimensional down-looking SAR imaging, HRWS imaging and Ground Moving Target Indication (GMTI), are discussed. Base on the discussion mentioned above, the advantages and disadvantages of MIMO-SAR system are analyzed, and the key technical issues in MIMO-SAR are summarized. At last, the prospects of MIMO-SAR application are pointed out.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Multi-Input Multi-Output (MIMO) radar; High-Resolution Wide-Swath (HRWS) imaging; Ground Moving Target Indication (GMTI)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)能够不受自然条件限制,对感兴趣的区域实行全天候、全天时地侦查监视,在国土测量、海洋监视、资源勘探、地形测绘、灾情普查、城市规划以及军事侦察等领域发挥着重要作用^[1]。随着 SAR 应用领域的拓展,常规的工作体制和成像模式

逐渐无法满足不断深化的应用需求,诸如高分辨率宽测绘带成像、慢速运动目标检测以及复杂电磁环境下 SAR 成像等应用领域面临诸多难题。鉴于此,开展新概念、新体制、新模式的 SAR 技术研究具有十分重要的意义。

近年来发展起来的多发多收(Multi-Input, Multi-Output, MIMO)雷达^[2,3]通过多天线同时发射、多天线同时接收的工作方式能够获得远多于实际天线数目的等效观测通道,在目标检测、参数估计以及雷达成像等方面具有优于传统体制雷达的系统性能,因此逐渐受到国内外专家和学者的广泛关

2013-08-08 收到, 2013-11-25 改回; 2013-12-03 网络优先出版

国家杰出青年基金(61025006)资助课题

*通信作者: 周伟 eric_zhou@nudt.edu.cn

注。MIMO 雷达与 SAR 相结合,为解决常规 SAR 面临的方位向高分辨与测绘带宽相互矛盾以及慢速运动目标检测等实际问题提供了新的技术途径。Younis 等人^[4]认为, MIMO 雷达、智能阵列天线以及数字波束形成(Digital Beam-Forming, DBF)等技术应用于 SAR 系统,标志着 SAR 的发展进入了新的历史阶段。

本文围绕 MIMO-SAR 成像技术及其应用展开论述、对当前国内外研究现状进行归纳和评述,分析 MIMO-SAR 体制的优势和不足,总结了当前研究中涉及的若干关键技术问题。最后,综合考虑 MIMO-SAR 的系统特点以及当前的实际应用需求,对 MIMO-SAR 应用前景进行展望,以期对相关研究者提供参考。

2 MIMO-SAR 概念及特点分析

2.1 MIMO-SAR 基本概念

随着 MIMO 雷达研究的深入, Ender^[5]在 2007 年首次提出了 MIMO-SAR 的概念,即“将相参 MIMO 雷达置于运动平台上,综合利用全部收发组合的回波数据进行相参成像,定义为 MIMO-SAR”。显然, Ender 给出的定义并未准确概括 MIMO-SAR 的系统概念。本文综合考虑 MIMO 雷达以及 SAR 系统的特点,将 MIMO-SAR 的概念表述为:

- (1) 多个发射/接收天线分布在运动平台之上;
- (2) 发射端多天线同时独立地发射多个波形,波形之间可以是相互正交或不相关;
- (3) 接收端多天线同时独立地接收场景回波,并能够通过一组滤波器分离出各个发射信号的回波;
- (4) 信号处理时,能够通过联合处理多观测通道的回波数据提高 SAR 系统性能。

本文将同时满足上述条件的 SAR 系统统称为 MIMO-SAR,图 1 给出了 MIMO-SAR 概念的示意图。

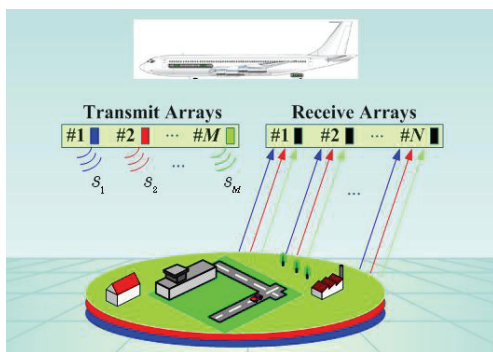


图 1 MIMO-SAR 概念示意图

Fig. 1 The diagram of MIMO-SAR conception

需要说明的是,当前 MIMO-SAR 的研究尚处于起步阶段,国内外学者对其概念尚未形成统一的认识。在研究过程中,通常将利用多平台、多天线、多孔径、波形编码、频率分集以及空-时-频分集等手段获取等效多通道能力的新体制 SAR 均归为 MIMO-SAR 的概念范畴,其目的在于拓展天线阵列孔径,增加系统自由度,从而为缓解常规 SAR 体制约束,提高 SAR 系统性能等提供新的解决方案。

2.2 MIMO-SAR 特点分析

参考 MIMO 雷达的分类方法^[6],本文将 MIMO-SAR 按照天线配置方式分为“同平台 MIMO-SAR”和“分布式平台 MIMO-SAR”两类。

同平台 MIMO-SAR 最主要的特点是所有发射和接收天线均安装在同一运动平台上。受平台尺寸限制,天线间隔通常远远小于雷达到场景中心的距离,因此目标相对于天线阵列满足远场近似条件。从天线配置和工作模式来看,同平台 MIMO-SAR 可以看作是常规阵列 SAR 的推广,不同之处在于:阵列 SAR 通常采用单发多收的工作方式,系统性能主要由接收阵列性能决定;而 MIMO-SAR 采用多天线同时发射、多天线同时接收的工作方式,系统性能取决于发射波形集的相关特性以及等效阵列的波束特性。按照阵列天线在平台上的分布方式,又可将同平台 MIMO-SAR 进一步分为距离向多天线 MIMO-SAR、方位向多天线 MIMO-SAR 以及距离向和方位向联合多天线 MIMO-SAR 等。

分布式平台 MIMO-SAR 最主要的特点是发射和接收天线分别放置在不同的运动平台上,通过雷达组网的方式构成分布式 SAR 系统,其概念的核心是双站 SAR。分布式 MIMO-SAR 可以看作是多站 SAR 的推广,不同之处在于:多站 SAR 通常由系统中某一平台负责发射信号以覆盖成像场景,其余平台只被动接收场景的回波信号,系统概念如图 2(a)所示;分布式 MIMO-SAR 系统中每个平台携带的雷达既能发射信号也能接收系统内其它雷达发射信号的回波,经过回波分离后能够获得更多观测视角下的目标散射信息,增强了合成孔径雷达系统的目标检测和识别性能^[7],系统概念如图 2(b)所示。

3 MIMO-SAR 应用分析

3.1 距离向分辨率增强技术

常规 SAR 系统的距离向分辨率取决于发射信号带宽。随着高分辨率 SAR 成像的需求,所需的信号带宽越来越大,极大地增加了信号发射、接收、采样以及处理的复杂度。MIMO 雷达利用发射端的系统自由度,通过多个窄带信号相参合成的方式得

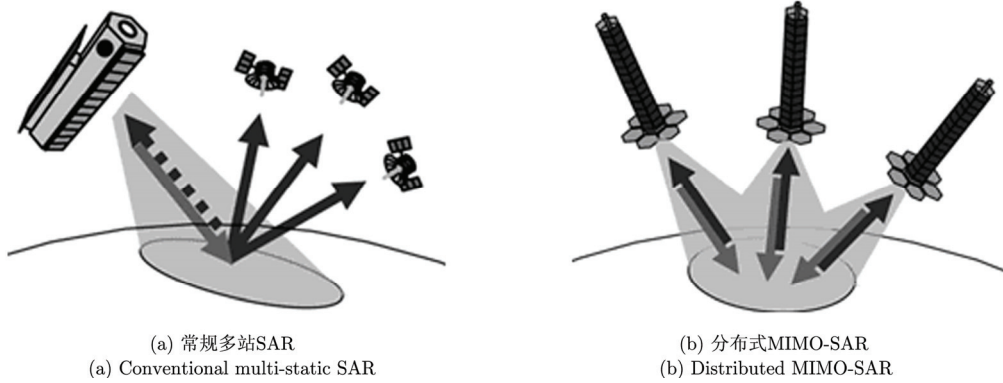


图2 分布式 MIMO-SAR 与多站 SAR 概念示意图

Fig. 2 The diagrams of distributed MIMO-SAR and multi-static SAR

到宽带回波,为提高 SAR 系统距离向分辨率提供了一种低成本的解决方案。从实现方式上来看,当前研究主要集中在两类方法:

第 1 类是基于宽带信号合成的方法。如黄平平等人^[8]将超宽带信号划分为多个子带信号,分别利用多个天线同时发射,并在接收端通过频域合成宽带的方法提高距离向分辨率;杨明磊等人^[9]采用同样的发射策略,但通过空域合成宽带的方式提高距离向分辨率。该类方法本质上是將发射大带宽信号的任务平均分配到多个发射天线,从而降低了单个发射机的复杂度。

第 2 类是利用分布式 MIMO-SAR 的阵列结构提高距离向分辨率,其基本思想概括为:切航迹方向编队飞行的多部 SAR 雷达,通过同时发射、同时接收的工作方式,在切航迹方向形成多个等效的相位中心。由于每个等效相位中心相对于目标区域具有不同的下视角,因此获得的距离向回波信号分别占据不同的频谱范围。利用多个回波之间的空间相位关系,能够合成更大带宽的距离向回波,从而显著地提高系统距离向分辨率^[10,11]。

上述两种提高系统距离分辨率的方法各有优势:第 1 类方法从波形分集的角度出发,能够降低系统硬件复杂度;第 2 类方法从空间分集的角度出发,对于未来无人机编队的 SAR 系统设计具有参考价值。

3.2 下视 3 维 SAR 成像技术

切航迹布阵的 SAR 系统^[12]利用平台运动形成的合成孔径获得方位向高分辨,利用脉冲压缩技术获得距离向高分辨,利用切航迹的长阵列获得横向高分辨率,系统成像模式如图 3 所示。阵列 SAR 下视 3 维成像^[13]能够克服传统侧视阵列 SAR 成像时的阴影效应,在城市、山区等复杂区域成像方面具有显著的优势。

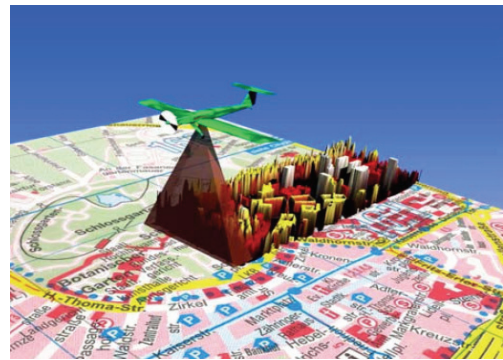


图3 阵列 SAR 3 维下视 SAR 成像示意图

Fig. 3 Three-dimensional down-looking SAR imaging operation

阵列 SAR 系统的横向分辨率取决于阵列的孔径大小,在平台尺寸、载荷、成本以及功率受限的条件下,通常难以获得满足分辨率需求的阵列孔径。德国应用科学研究所(Forschungs Gesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften, FGAN)研制了无人机的 ARTINO(Airborne Radar for Three dimensional Imaging and Nadir Observation)雷达系统,阵列天线配置如图 4 所示。Wei β 等人^[14-17]对 ARTINO 3 维成像系统的工作原理、成像方法、工作模式以及系统组成等进行了深入的研究,但到目前为止,还尚未见到 ARTINO 系统的实测数据成像结果。针对因机翼振动导致天线阵列畸变的问题,Klare 等人^[18,19]分析了该误差对系统成像质量的影响,同时提出了该误差的校正方法。国内的谢文成^[20]、杜磊^[21]、段广青^[22]等人分别在系统原理、成像方法、阵列和波形设计、性能与误差分析等方面开展了探索性研究,取得了一些有价值的研究成果。

综合国内外研究现状来看,基于 MIMO 雷达的下视 3 维 SAR 成像技术尚处于初步研究阶段,在理论模型、成像方法以及系统设计等各方面还有待进一步研究。

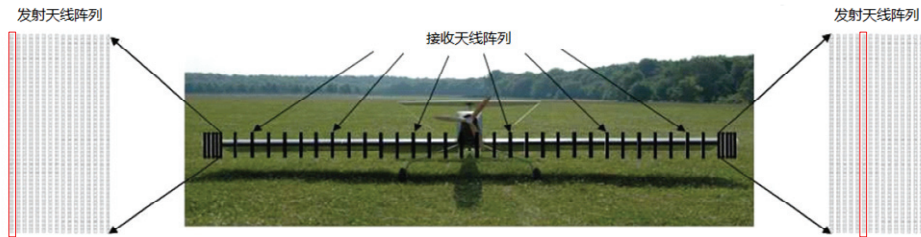


图 4 ARTINO 3 维下视 SAR 成像系统

Fig. 4 ARTINO three-dimensional down-looking SAR imaging system

3.3 高分辨率宽测绘带成像技术

方位向高分辨率和宽测绘带之间相互制约的矛盾问题^[23-25]是星载 SAR 系统发展的主要瓶颈之一。多通道 SAR 系统通过俯仰向/方位向增加多个接收通道,利用系统空间自由度消除距离向或方位向模糊,是缓解上述矛盾问题的有效途径之一。然而,在星载平台尺寸、载荷、功率以及成本等因素受限的条件下,通常难以获得足够的接收通道数目,因此系统解模糊能力有限。MIMO 雷达的体制优势在于利用较少的天线获得较高的空间自由度,因此 MIMO-SAR 在解决方位向高分辨率与测绘带宽的矛盾问题上,具有优于常规单通道或多通道 SAR 的系统性能,是未来 SAR 系统发展的重要方向之一。

在国外,德国宇航中心的 Krieger 等人^[26]对 MIMO-SAR 进行了深入研究,指出 MIMO 雷达与 DBF 技术相结合是解决星载 SAR 系统固有约束的有效途径,也是未来 SAR 系统的重要发展方向。DBF MIMO-SAR 的基本思想是:在发射端通过方位向或俯仰向多子阵同时发射多个正交编码信号覆盖宽测绘带成像场景,接收时利用系统快速、灵活的数字波束形成能力实现回波分离和解模糊,从而有效缓解方位向高分辨率与宽测绘带的矛盾。

西安电子科技大学的井伟等人^[27]提出了基于多子带并发的 MIMO-SAR 高分辨宽测绘带成像方法,通过综合利用 MIMO 雷达多相位中心回波的相位信息解方位向模糊,利用多子带并发频率步进信号合成宽带距离向信号,进而实现高分辨宽测绘带成像。基于离散频率编码正交波形集,西安电子科技大学的武其松等人^[28]提出了 3 种 MIMO-SAR 高分辨宽测绘带成像策略,包括:多维波形编码俯仰向线阵 MIMO-SAR、多维波形编码面阵 MIMO-SAR 以及多维波形编码多频面阵 MIMO-SAR,并探讨了相应的成像处理算法。国防科技大学的王力宝等人^[29]以星载 MIMO-SAR 为研究对象,分析了采用空间采样代替时间采样而引入的等效相位中心误差,在引入系统权衡自由度的基础上,研究了频率

分集波形 MIMO-SAR 以及编码正交波形 MIMO-SAR 的高分辨率宽测绘带成像技术。电子科技大学的王文钦等人^[30-34]对 MIMO-SAR 成像涉及的波形设计、信号分离以及成像方法等问题开展了深入研究。

3.4 运动目标检测技术

基于 SAR 数据的运动目标检测技术能够在获取静态场景图像的同时,实现运动目标检测、成像,并准确标定到 SAR 图像上,在战场侦察、海洋监视以及交通监管等领域发挥着重要作用。

2009 年国际波形分集与设计会议上,美国林肯实验室(Lincoln laboratory)的 Bliss 等人^[35]分析了相参 MIMO 雷达实现地面动目标检测的相关技术。研究表明,相参 MIMO 雷达的根本优势在于能够利用稀疏阵列高分辨率的特性却避免了栅瓣效应,从而为利用大稀疏孔径天线降低系统最小可检测速度(Minimum Detectable Velocity, MDV)提供了技术途径。Bliss 等人^[36-38]还对 MIMO GMTI 发射波形、检测概率、参数估计等进行了研究,研究结果表明 MIMO 体制 GMTI 在慢速运动目标检测、速度估计等方面具有优于传统体制雷达的系统性能。

综合 MIMO-SAR 系统特点以及国内外研究成果,基于 MIMO-SAR 的动目标检测技术具有如下优势:(1)在同样阵列配置的条件下,MIMO-SAR 更高的自由度增强了系统对杂波和干扰的抑制能力,因此对于场景中弱小、慢速运动目标的检测能力更强;(2)MIMO 雷达采用分集波形,通过多波形融合检测技术^[39]能够提高动目标检测概率,消除盲速;(3)MIMO-SAR 系统具有远多于实际天线数目的系统自由度,因此在利用部分系统自由度实现高分辨宽测绘带成像的同时,仍然具备很强的动目标检测能力。MIMO-SAR 这一优势对于实现大场景动目标监视具有重要价值。

4 MIMO-SAR 若干关键技术问题分析

经过多年的发展,虽然国内外学者在 MIMO 雷达理论和应用方面均取得了丰硕成果,但关于

MIMO-SAR 的研究还相对较少,在系统概念、理论模型、成像策略与方法以及性能评估等方面仍然缺乏统一的理论体系,许多关键技术问题还有待进一步突破和完善。通过对文献的分析和梳理,并结合 SAR 系统自身的特点,本文总结出实现 MIMO-SAR 系统需要克服的若干关键技术问题。

4.1 正交波形集优化设计

基于相位编码或离散频率编码的正交波形虽然广泛应用于 MIMO 雷达,但该类波形通常难以直接推广到 MIMO-SAR 成像中,主要原因包括:

(1) 当前大多数正交波形集以空间监视为应用背景,待检测目标通常可以看作是理想散射点,因此在波形设计时重点关注波形集自相关和互相关函数的峰值旁瓣比(Peak Sidelobe Level Ratio, PSLR)。然而 MIMO-SAR 成像属于对地观测的范畴,成像场景包含大量分布式目标,为确保场景中的弱散射区域不被邻近的强散射区域所污染,更加关注波形集相关函数的积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Level Ratio, ISLR)性能^[40]。综上, MIMO 雷达和 MIMO-SAR 对波形相关特性的关注点不同。

(2) 为满足系统分辨率和信噪比的要求, SAR 通常需要发射大时宽-带宽积信号。线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)是常用的成像波形,但该类波形缺乏足够的自由度来满足波形正交特性的需求^[41];相位编码信号^[42]频谱利用率低,“大时宽-带宽积”波形往往需要较多的子脉冲,波形设计复杂度较高。

(3) 相位编码以及离散频率编码波形集对多普勒变化较为敏感,当平台高速运动时,较大的多普勒频移将导致脉冲压缩滤波器失配,从而引起信噪比损失^[43]。

(4) 相位编码、离散频率编码等波形通常需要复杂的接收机滤波器实现脉冲压缩,并且距离徙动校正以及方位向聚焦处理更加复杂,难以利用传统 SAR 处理器进行成像,从而增加了系统复杂度和硬件成本。

正交波形集设计是 MIMO-SAR 系统实现的主要难题之一,波形正交策略以及调制方式的选择均对系统成像性能产生至关重要的影响。综合考虑 MIMO 雷达以及 SAR 成像对波形集的性能需求,设计出具有大时宽-带宽积、良好相关函数特性以及较高多普勒容限的正交波形集是实现 MIMO-SAR 成像需要解决的关键技术问题之一。

4.2 阵列构型优化设计

合理的阵列设计不仅能够提高系统性能、降低

系统硬件成本,还决定了 MIMO-SAR 成像模式、处理方法等^[44-46]。

MIMO-SAR 阵列设计首先需要解决阵列类型的选择问题。Ender 等人^[44]讨论了 MIMO-SAR 的布阵方式,将 MIMO-SAR 阵列分为 4 种类型:(1)方位向 1 维线阵,即多天线沿平台运动方向布置。该类布阵方式能够提高系统方位向上的空间自由度,主要用于高分辨率宽测绘带 SAR 成像、运动目标检测等;(2)距离向 1 维线阵,即多个天线沿切航迹方向布置,能够实现下视 3 维成像以及前视或后视 SAR 成像;(3)高度向 1 维线阵,即多天线垂直于水平平面布置,利用高度向多通道回波之间的相位差实现干涉 SAR 成像;(4)混合阵,即多个发射和接收天线围绕某一参考点布置,在距离、方位、高度向均能形成多个基线,该类 MIMO-SAR 布阵方式能够实现同时多模式工作。

根据 SAR 工作模式确定阵列类型后,需要优化设计发射和接收天线数量、间隔等参数。研究表明, MIMO 雷达形成的虚拟阵列为发射阵列位置矢量与接收阵列位置矢量的空间卷积^[47],同样的等效阵列可由多种发射、接收阵列组合实现。以形成包含 64 个虚拟阵元的 MIMO 雷达阵列为例,图 5 列举了 3 种发射天线和接收天线的阵列构型^[48]。由结果可以看出,虽然 3 种阵列构型通过多发多收的工作方式能够产生相同的等效阵列,但在阵元数量、阵元间隔上都存在较大差异。当确定等效空间采样阵列后,求解实际的发射和接收阵列组合是一个病态问题,极大地增加了问题求解的复杂度。阵列设计时既要确保遍历所有可能的收发组合,还需要综合考虑平台尺寸、系统成本等因素来选择最优的收发组合。

4.3 综合成像处理技术

与常规单/多通道 SAR 系统相比, MIMO-SAR 信号处理时增加了两项工作:首先,需要设计一组滤波器实现多个发射信号的回波分离,从而形成更多的观测通道;其次,需要综合利用多观测通道的回波数据提高系统整体性能。

良好的回波信号分离是实现 MIMO-SAR 体制优势的基础。由于发射波形集的非理想正交性,基于传统匹配滤波的回波分离方法存在较高的互相关输出,导致目标图像的 ISLR 较高。虽然基于自适应脉冲压缩(Adaptive Pulse Compression, APC)技术^[49]的回波分离方法能够有效克服回波信号互相关输出的影响,但面临着运算量大、硬件实现复杂等缺点。美国佛罗里达大学的 Li 等人^[50]采用辅助变量法设计接收机滤波器,能够进一步降低系统的互相

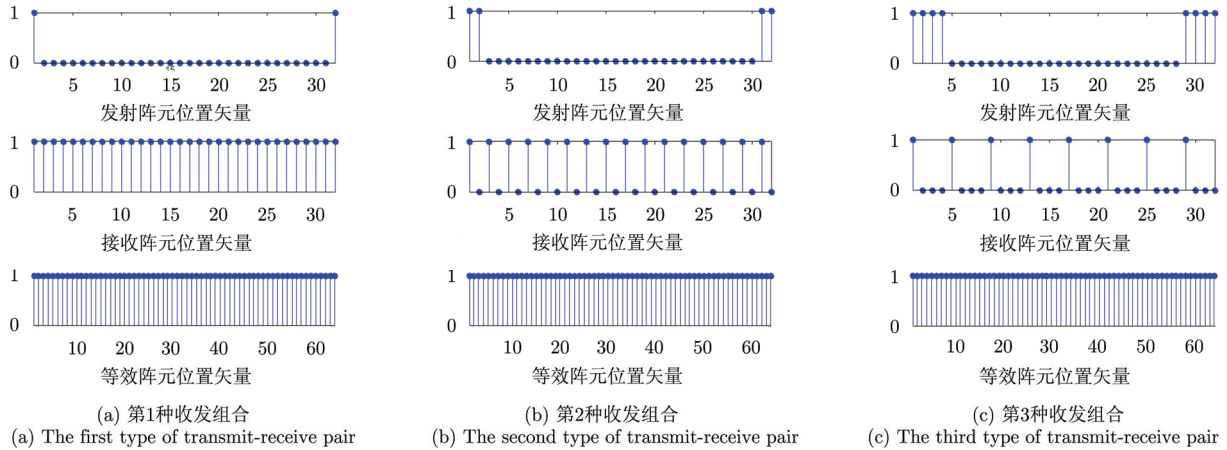


图5 典型的发射、接收阵列组合

Fig. 5 The array combination of classical transmit-receive pairs

关输出,从而有效缓解强目标回波旁瓣对临近弱小目标的压制效应,但该算法同样面临计算复杂度高的缺点。如何进一步优化回波分离滤波器的性能,降低多回波信号之间的相互影响是需要解决的关键问题之一。

在成像处理方面, MIMO-SAR 的基本思想是:综合利用方位向/俯仰向形成的虚拟阵列的接收数据,消除方位向或距离向模糊信号,从而实现高分辨率宽测绘带成像,主要方法包括波形编码^[51]、多通道滤波^[52]、数字波束形成^[53]等。上述方法本质上是借鉴了多通道 SAR 的处理思路,对 MIMO-SAR 系统的特点考虑不足,仍然有待进一步改进。

综上, MIMO-SAR 特殊的收发模式以及波形分集的特点,使得现有的 SAR 成像算法难以直接推广应用,因此探索适用于 MIMO-SAR 的成像处理策略和成像方法是一个需要深入研究的课题。

5 前景展望

虽然目前关于 MIMO-SAR 成像技术的研究还处于理论探索的起步阶段,但其潜在的体制优势受到国内外学者的广泛关注。如何最大程度地发挥 MIMO-SAR 的体制优势,拓展 MIMO-SAR 技术的应用范围是雷达领域专家学者普遍关心的问题。综合考虑实际应用需求以及 MIMO-SAR 系统自身的特点,本文预测 MIMO-SAR 在以下领域存在较好的应用前景:

(1) 同时 SAR 和 GMTI 应用

MIMO-SAR 雷达利用多发多收阵列和波形分集,显著地增加了系统自由度。以波形编码、数字波束形成等方式代替传统的波束扫描,有望同时实现 SAR 和 GMTI 两种工作模式,对实现战场实时监控有重要意义。

(2) 无人机编队多站 SAR 成像应用

编队飞行的无人机载 SAR 系统采用多发多收的工作方式,能够增强系统分辨率和场景成像速率,并且具有成本低、抗摧毁、抗干扰等优点,是未来 MIMO-SAR 系统发展的重要应用之一。

(3) 感知雷达成像应用

MIMO 雷达具有空间分集和波形分集的特点,发射波形能够在时间、频率以及空间等多个域融合系统的反馈输出以及辅助信息,对实现感知雷达探测、成像以及识别等应用具有重要价值。

(4) 雷达-通信一体化应用

MIMO 雷达概念源于通信领域,具有频谱利用率高、信道容量大以及抗信道衰落等优势。MIMO 雷达-通信一体化为解决 SAR 大数据量传输问题提供了一条有效的解决途径。

6 结束语

常规单通道 SAR 由于系统固有体制约束,面临着方位向高分辨率与宽测绘带指标相互矛盾、慢速运动目标难以检测等实际问题。虽然多通道 SAR 系统通过增加接收通道数目能够缓解上述问题,但对于平台体积、尺寸、载荷等严格受限的星载 SAR 系统而言,通常难以获得足够数量的接收通道。为进一步提高 SAR 系统的空间自由度,研究人员开始将目光聚焦到发射端,将单天线发射拓展到多天线发射,将单一波形拓展到多维波形,从而形成了同时多天线发射、同时多天线接收的系统概念。当前初步的研究表明, MIMO-SAR 在实现高分辨率宽测绘带 SAR 成像以及慢速运动目标检测等应用中具有重要的价值,是未来 SAR 系统发展的主要方向之一。

参考文献

- [1] Moreira A, Prats P, Younis M, *et al.* A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(1): 6-43.
- [2] Li J and Stoica P. MIMO radar with colocated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106-114.
- [3] Haimovich A M, Blum R S, Leonard J, *et al.* MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.
- [4] Younis M, Bordonni F, Gebert N, *et al.* Smart multi-aperture radar techniques for spaceborne remote sensing[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Boston, MA, 2008: 278-281.
- [5] Ender J. MIMO-SAR[C]. International Radar Symposium, Cologne, Germany, 2007: 580-588.
- [6] Li J and Stoica P. MIMO Radar Signal Processing[M]. New York: Wiley, 2009: 2-10.
- [7] Sabry R. A new approach for radar/SAR target detection and imagery based on MIMO system concept and adaptive space-time coding [R]. Ottawa: Defense R&D Canada, 2007.
- [8] 黄平平, 邓云凯, 徐伟, 等. 基于频域合成方法的多发多收 SAR 技术研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 401-406.
Huang Ping-ping, Deng Yun-kai, Xu Wei, *et al.* The research of multiple-input and multiple-output SAR based on frequency synthetic [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(2): 401-406.
- [9] 杨明磊, 张守宏, 陈伯孝. 多载频 MIMO 雷达的一种新的信号处理方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 147-151.
Yang Ming-lei, Zhang Shou-hong, and Chen Bo-xiao. A novel signal processing approach for the Multi-Carrier MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 147-151.
- [10] Cristallini D and Pastina D. Exploiting MIMO SAR potentialities with efficient cross-track constellation configurations for improved range resolution[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 49(1): 38-52.
- [11] Cristallini C D. Innovative adaptive techniques for multi-channel spaceborne SAR systems[D]. [Ph.D. dissertation], University of Roma, 2010: 12-24.
- [12] Mahafza B R and Sajjadi M. Three dimensional SAR imaging using linear in transverse motion[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1996, 32(1): 499-510.
- [13] Ahmad F and Amin M G. Multi-Input Multi-Output synthetic aperture radar technology for urban area surveillance[C]. The 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Seoul, Korea, 2011: 1-4.
- [14] Wei ß M and Ender J. A 3D imaging radar for small unmanned airplanes ARTINO[C]. European Radar Conference, Paris, France, 2005: 229-232.
- [15] Wei ß M, Peters O, and Ender J. A three dimensional SAR system on an UAV[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, 2007: 5315-5318.
- [16] Klare J, Wei ß M, Peters O, *et al.* ARTINO: a new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Denver, USA, 2006: 3842-3845.
- [17] Klare J, Brenner A, and Ender J. A new airborne radar for 3D imaging-image formation using the ARTINO principle[C]. The European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Dresden, Germany, 2006: 103-107.
- [18] Klare J, Cerutti-Maor D, Brenner A, *et al.* Image quality analysis of the vibrating sparse MIMO antenna array airborne 3D imaging radar ARTINO[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, ESP, 2007: 5310-5314.
- [19] Klare J, Brenner A, and Ender J. Impact of platform attitude disturbances on the 3D imaging quality of the UAVARTINO[C]. The European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Friedrichhafen, Germany, 2008: 1-4.
- [20] Xie W C, Zhang X L, and Shi J. MIMO antenna array design for airborne down-looking 3D imaging SAR[C]. The 2th International Conference on Signal Processing Systems, Dalian, China, 2010: 452-456.
- [21] Du L, Wang Y P, Wen H, *et al.* Downward-looking 3D-SAR with dual-transmit and multi-receive linear array antennas based on time and waveform diversity[C]. The Asian Pacific Conference on Synthetic Aperture radar, Xi'an, China, 2009: 17-20.
- [22] Duan G Q, Wang D W, Ma X Y, *et al.* Three-dimensional imaging via wideband MIMO radar system[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 445-449.
- [23] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 156-185.
Yuan Xiao-kang. Introduce to the Spaceborne Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 156-185.
- [24] 赖涛. 星载多通道 SAR 高分辨率宽测绘带成像方法研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2010: 1-15.
Lai Tao. Study on HRWS imaging methods of multi-channel spaceborne SAR[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2010: 1-15.
- [25] Currie A and Brown M A. Wide swath SAR[J]. *IEE*

- Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1992, 139(2): 122-135.
- [26] Krieger G. MIMO SAR: opportunities and pitfalls[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2263934.
- [27] 井伟. 星载 SAR 宽测绘带高分辨率成像技术研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2008: 83-96.
Jing Wei. Study of wide-swath high resolution spaceborne spaceborne synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], Xi'dian University, 2008: 83-96.
- [28] 武其松. 双/多通道 SAR 成像技术研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2010: 53-80.
Wu Qi-song. Research on multichannel SAR imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Xi'dian University, 2010: 53-80.
- [29] 王力宝. 多输入多输出合成孔径雷达关键技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2010: 49-65.
Wang Li-bao. Research on challenge technologies of MIMO-SAR[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2010: 49-65.
- [30] Wang W Q. Mitigating range ambiguities in high-PRF SAR with OFDM waveform diversity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 101-105.
- [31] Wang W Q. Large-area remote sensing in high-altitude high speed platform using MIMO SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(5): 2146-2158.
- [32] Wang W Q. Space-time coding MIMO-OFDM SAR for high-resolution imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3094-3104.
- [33] Wang W Q. MIMO-based SAR ground moving target detection approach[C]. 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Shenzhen, Guangdong, 2011: 608-611.
- [34] Wang W Q and Cai J Y. Ground moving target indication by MIMO SAR with multi-antenna in azimuth[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver, BC, 2011: 1662-1665.
- [35] Bliss D W, Forsythe K W, Davis S K, *et al.* GMTI MIMO radar[C]. International Waveform Diversity and Design Conference, Kissimmee, FL, 2009: 118-122.
- [36] Bliss D W. MIMO radar joint array and waveform optimization[C]. The 41th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 2007: 207-211.
- [37] Kantor J M and Bliss D W. Clutter covariance matrices for GMTI MIMO radar[C]. The 43th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 2010: 1821-1826.
- [38] Forsythe K W and Bliss D W. MIMO radar waveform constraints for GMTI[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 21-32.
- [39] 邹博. 多发多收雷达 GMTI 研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2011: 94-100.
Zou Bo. Study of GMTI in MIMO radar[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2011: 94-100.
- [40] Zou B, Dong Z, and Liang D N. Design and performance analysis of orthogonal coding signal in MIMO-SAR[J]. *SCIENCE CHINA Information Science*, 2011, 54(8): 1723-1737.
- [41] Mittermayer J and Martinez J M. Analysis of range ambiguity suppression in SAR by up and down chirp modulation for point and distributed targets[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Toulouse, France, 2003: 4077-4079.
- [42] Hai D. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(11): 3126-3135.
- [43] Khan H A and Edwards D J. Doppler problems in orthogonal MIMO radars[C]. IEEE Radar Conference, New York, USA, 2006: 244-247.
- [44] Ender J H G and Klare J. System architectures and algorithms for radar imaging by MIMO-SAR[C]. IEEE Radar Conference, Pasadena, CA, 2009: 1-6.
- [45] Wang L B, Xu J, Peng S B, *et al.* Optimal linear array configuration and DOF tradeoff for MIMO SAR[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2010, 20(2): 380-384.
- [46] Ender J. Along-track array processing for MIMO-SAR MTI[C]. The European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Friedrichshafen, Germany, 2010: 1-3.
- [47] 粟毅, 朱宇涛, 郁文贤. 多通道雷达天线阵列的设计理论与算法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40(10): 1372-1383.
Su Yi, Zhu Yu-tao, and Yu Wen-xian. Multi-channel radar array design method and algorithm[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2010, 40(10): 1372-1383.
- [48] 吴子斌, 朱宇涛, 粟毅, 等. 用于机载线阵三维 SAR 成像的 MIMO 阵列构型设计[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(11): 2672-2677.
Wu Zi-bin, Zhu Yu-tao, Su Yi, *et al.* Multi-channel radar array design method and algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2672-2677.
- [49] Li N, Tang J, and Peng Y N. Adaptive pulse compression of MIMO radar based on GSC[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(20): 1217-1218.
- [50] Roberts W, He H, Li J, *et al.* Probing waveform synthesis and receiver filters design[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(4): 99-112.
- [51] Feng F, Li S Q, Yu W D, *et al.* Study on the processing scheme for space-time waveform encoding SAR system based on two-dimensional digital beamforming[J]. *IEEE Transactions*

on *Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(3): 910-932.

- [52] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260-264.

- [53] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564-592.

作者简介



周伟(1985-),男,安徽亳州人,国防科学技术大学博士研究生,主要研究方向为MIMO雷达、阵列信号处理、新体制合成孔径雷达等。

E-mail: eric_zhou@nudt.edu.cn



黎湘(1967-),男,湖南浏阳人,国防科学技术大学教授,博士生导师,主要研究方向为雷达系统与信号处理、雷达自动目标识别等。

E-mail: lixiang01@vip.sina.com



刘永祥(1976-),男,河北唐山人,国防科学技术大学教授,博士生导师,主要研究方向为目标电磁特征信号分析、雷达目标识别等。

E-mail: lyx_bible@sina.com.cn



凌永顺(1937-),男,安徽定远人,解放军电子工程学院教授,博士生导师,中国工程院院士,主要研究方向为雷达隐身、红外隐身、电子伪装和雷达红外复合干扰等。