

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.020

引用格式:林晨晨,黄普明,李渝.多通道 SAR-GMTI 技术的研究进展[J].电讯技术,2017,57(1):118-126. [LIN Chenchen, HUANG Puming, LI Yu. Research progress in multichannel SAR-GMTI[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(1):118-126.]

## 多通道 SAR-GMTI 技术的研究进展\*

林晨晨\*\*,黄普明,李渝

(中国空间技术研究院 西安分院,西安 710100)

**摘要:**基于合成孔径雷达的多通道运动目标检测系统(SAR-GMTI)可以在对地面静止场景进行高分辨率成像的同时完成强杂波环境下的慢速运动目标检测,在军事和民用领域中具有很高的应用价值。首先,简要介绍了多通道 SAR-GMTI 系统的基本概念,对比了机载与星载、SAR 成像与 GMTI 的同时与分时处理等不同系统的特点,并系统梳理了国内外研究现状;然后,选取分布式 SAR-GMTI 系统和基于 MIMO 的 SAR-GMTI 系统两个方向进行重点分析;最后,探讨了 SAR-GMTI 系统的研究重点,并对其发展进行了展望。

**关键词:**合成孔径雷达;地面运动目标检测;分布式雷达;多输入多输出;研究进展

**中图分类号:**TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2017)01-0118-09

## Research Progress in Multichannel SAR-GMTI

LIN Chenchen, HUANG Puming, LI Yu

(China Academy of Space Technology-Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The multichannel ground moving target indication system based on the synthetic aperture radar (SAR-GMTI) can obtain high resolution SAR images of stationary scene and detect slowly moving targets in the region with strong clutter interference simultaneously, therefore it plays an important role in military and civil applications. Firstly, with regard to multichannel SAR-GMTI, this paper gives a brief introduction to the basic conception, and comparisons between airborne and spaceborne systems, simultaneous processing of SAR imaging with GMTI and time-sharing processing. Afterwards, it systematically presents the advances abroad and domestic. Then two directions are analyzed emphatically which are distributed space borne SAR-GMTI and the SAR-GMTI system based on multiple-input multiple-output (MIMO). Finally, the research emphasis of SAR-GMTI system is discussed, along with its promising prospect.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); ground moving target indication (GMTI); distributed radar; multiple-input multiple-output (MIMO); research progress

### 1 引言

地面运动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI)技术自问世以来,已经在军事、民用等领域发挥了不可替代的作用:在军事侦察和战场态势感知方面,搭载在高空运动平台(飞机、浮空器、卫星等)上的雷达可以有效克服地球曲率的限制,增大探测范围;在海上交通监视、道路车流量监控等

方面,借助于雷达全天时、全天候工作的特点,可以大大降低对现场环境的依赖程度。为便于描述,本文中提到的 GMTI 系统是指涵盖了运动目标检测、定位及参数估计等多项功能的综合系统。

SAR-GMTI 系统是指基于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)回波进行地面运动目标检测的系统。相比于脉冲多普勒(Pulse Doppler,

\* 收稿日期:2016-05-25;修回日期:2016-08-05 Received date:2016-05-25;Revised date:2016-08-05

\*\* 通信作者:daisy\_0612@hotmail.com Corresponding author:daisy\_0612@hotmail.com

PD)体制的动目标检测系统而言,基于 SAR 体制的 GMTI 系统具有相关脉冲积累 (Coherent Pulse Integration, CPI) 时间长、频率分辨率高的特点,有利于强杂波背景下的微弱慢速目标检测。其中的杂波抑制步骤可以在数据域进行,如多普勒后处理通过长 CPI 积累降低杂波秩;也可以在图像域进行,如子空间投影法<sup>[1]</sup>以及基于最小均方误差准则的空间维纳滤波器<sup>[2]</sup>等,利用 SAR 高分辨成像能力将杂波局域化,降低杂波自由度。

本文对近年来多通道 SAR-GMTI 系统中出现的新技术进行了整理,首先,介绍了多通道 SAR-GMTI 的基本概念,列举现有的典型系统,分析了相应的杂波抑制和检测算法;然后,选取两个研究热点进行了详细分析,包括分布式 SAR-GMTI 系统、基于多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术的 SAR-GMTI 系统。在每个模块中,首先简要介绍了相应的基本概念,然后详细分析其优势与不足,并进一步总结了当下的研究热点及需要解决的关键技术问题。最后,结合当前的应用需求与 SAR-GMTI 系统的特点,对其发展前景进行了展望,旨在为相关科研工作者提供一定的参考。

## 2 多通道 SAR-GMTI 概念及典型系统

### 2.1 多通道 SAR-GMTI 概念

多通道 SAR-GMTI 系统是指将一个大口径天线沿方位向划分为多个子孔径,每个子孔径对应一个接收通道,在接收端使用数字波束形成 (Digital Beam Forming, DBF) 技术可以同时完成高分辨率成像和动目标检测的功能。其在动目标检测方面的优势是:多个接收通道产生的多个相位中心使得空域自由度大大增加,有利于提升杂波抑制性能和动目标参数估计精度,从而提升 GMTI 性能。

搭载于不同飞行平台上的 SAR-GMTI 系统的应用和难点各异,如:近距离机载 SAR-GMTI 雷达对天线发射功率要求较低,远距离工作时,机载雷达由于不像星载雷达受到发射重量等限制,功率一般也可满足要求;机载雷达多使用中小型相控阵天线,并且灵活机动,其功能已经得到了实际系统的验证,相关技术较为成熟。但是,机载平台带来的固有缺陷,如有效航程短、覆盖范围有限、飞行平台运动不稳定、飞行区域受领空限制、易受攻击等也限制了机载 SAR-GMTI 系统的应用。

星载雷达恰好可以弥补机载雷达的以上不足:

相对于机载雷达,星载雷达运动速度高,运动轨迹稳定,轨道高,覆盖面积广。然而,这些特点也带来了新的问题:地杂波频谱严重扩展,杂波非平稳性严重,巨大的数据量对处理器件和传输器件造成的压力等。另外,星载系统在发射功率、天线面积以及成本等方面也对天线提出了新的要求。

具备 SAR 成像和动目标检测功能的系统可以分双模分时工作和同时工作两大类。其中,双模分时系统<sup>[3]</sup>是指系统可在 SAR 成像和 GMTI 两种模式之间分时切换,两种模式可以分别发射不同信号以适应各自应用需求。同时工作系统是指使用同一雷达回波同时实现成像和动目标检测。同时工作系统又可以分为 3 类,即分通道、图像域共用通道和数据域共用通道,如图 1 所示。同时共用通道的处理方式节约时间和通道成本,设计时要综合考虑两种模式的兼容性。

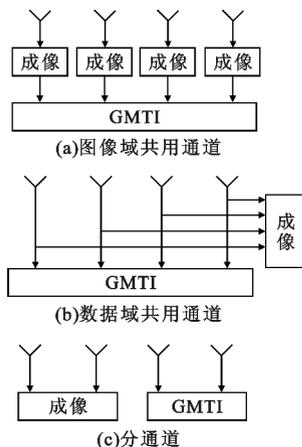


图 1 同时处理系统分类示意图

Fig. 1 Classification of simultaneous working systems

### 2.2 典型系统

机载 SAR-GMTI 监视雷达可通过对地面进行成像和动目标检测,提供战场态势分析资料,协助进行精确打击。其中,美国在海湾战争中大显神威的 JSTARS (Joint Surveillance and Target Attack Radar System) 使用长 7.3 m、高 0.6 m 的相控阵天线,沿航向划分为 3 个通道;英国的 ASTOR (Airborne Stand-Off Radar) 系统作用距离大于 250 km,使用多通道杂波对消的方式,实现最小可检测速度优于 10 km/h;德、法、意、西、荷 5 国联合研制的 SOSTAR (Stand-Off Surveillance and Target Acquisition Radar) 系统具备广域 GMTI 能力,并且可以将图像数据通过宽带数据链实时下传至地面;德国自主研发的 PAMIR (Phased Array Multifunctional Imaging Radar) 系统天线方位尺

寸为0.8 m,划分为3个接收通道,最终设计目标是方位尺寸达到4.25 m,分为5个通道,将1.8 GHz的带宽划分为5个子频带,以解决盲速和速度估计模糊的问题,进一步改善 GMTI 性能。

图2为德国宇航中心对某高速公路进行的一次机载实验<sup>[4]</sup>,其中红色方框内为运动目标检测结果,三角形的位置和颜色分别表示对车辆进行重定位和速度估计的结果。

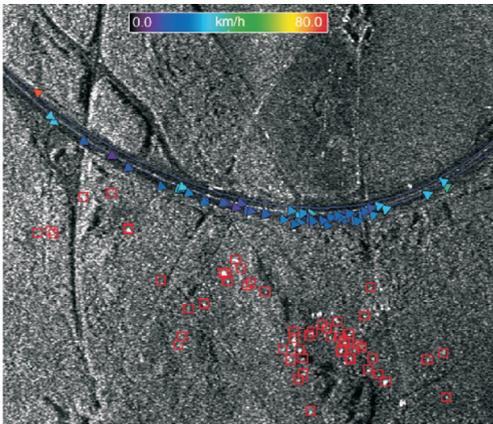


图2 一例机载 SAR 动目标检测结果  
Fig.2 An example of airborne SAR-GMTI

目前在轨及在研的星载 SAR 系统一般既包括单颗星上子孔径划分形成的多通道,又包括了多颗卫星组成分布式多相位中心。单星 SAR-GMTI 系统中,加拿大的 Radarsat-2 和德国的 TerraSAR-X 均为双通道;具有代表性的分布式星载 SAR-GMTI 系统有德国的 TerraSAR-X (TSX)/TanDEM-X (TDX) 双星系统、加拿大的 Radarsat 星座、欧洲航天局的 Sentinel-1 星座计划和意大利的 COSMO-SkyMed 星座等。

分布式星载 SAR-GMTI 的优势在于长短基线结合,以 TSX/TDX 为例,单星前后接收通道间隔为 2.4 m,双星顺轨基线可调整至 100 m,长短基线结合在降低最小可检测速度的同时提高了最大不模糊测速区间。多数分布式星载 SAR 系统的主要功能是获取图像与高精度数字高程测量数据,SAR-GMTI 功能仅作为实验模式,但其在动目标检测方面仍具有较大发展潜力。

### 3 多通道 SAR-GMTI 杂波抑制方法

当前的多通道 SAR-GMTI 算法中,相位中心偏置天线 (Displaced Phase Center Antenna, DPCA) 法和沿航迹干涉 (Along Track Interferometry, ATI) 法相

对较为简单,已通过实际的机载和星载系统验证。

DPCA 法使用两个或多个相位中心,通过移位相位中心,补偿掉由于飞行平台运动带来的多普勒展宽,使得杂波频谱带宽变窄,进而检测出运动目标,尤其是慢速运动目标。2013 年,文献[5]提出适用于任意多个通道数目的 EDPCA 方法,突破了 DPCA 条件的限制。

ATI 方法与 DPCA 十分相似,将 DPCA 中各通道回波相减改为共轭相乘。近年来,国内外学者研究了动目标径向速度、入射角、发射信号带宽和地形起伏对 DPCA 和 ATI 两种检测性能的影响,认为 ATI 在杂波和噪声能量较高的情况下虚警概率高,DPCA 则受通道误差的影响较大。

与 DPCA 和 ATI 相比,空时自适应处理 (Space Time Adaptive Processing, STAP) 滤波类算法稳健性较好且最小可检测速度 (Minimum Detectable Velocity, MDV) 较低。基于脉冲多普勒体制的 STAP 已经在机载雷达上得到了应用。然而,与 DPCA 相比,基于 SAR 回波的 STAP 法分别在空间 (阵元数目) 和时间 (相干积累时间) 两个维度上增加了数据量,导致计算复杂度大大提高,且实时性较差,难以直接投入应用。

考虑到现有杂波抑制算法的以上特点,近年来杂波抑制与检测算法的发展可以大致分为以下 4 个方向:

#### (1) STAP 算法的降维与降秩

针对 STAP 算法高计算量与实时性要求的矛盾,国内外学者在 STAP 算法降维、降秩方面做了大量研究,王永良在文献[6]中对此做了详细总结,此处不再赘述。然而,目前此类方法大多针对机载 PD 雷达回波,如何结合 SAR 回波在多普勒域和图像域的特点进行快速自适应处理,是值得研究的问题。

#### (2) 复杂环境下的算法修正

主要针对的是非均匀环境中 STAP 算法性能的提高,比较经典的例子是 Ender 等人提出的相干变换法<sup>[7]</sup>,以及近年来国内学者提出的先验辅助多通道 SAR-STAP 法、改进的 FRACTA 算法、基于俯仰分割的阵列插值信号重建算法等。另外,在山地、近水区域及海面等特殊场景下的改进算法也需特殊考虑。

#### (3) 基于先验知识的多级检测

合理的先验知识可以用于校正误差,弥补训练样本的不足;多级检测器以简单的 DPCA、ATI 为基础,针对不同场景和动目标增加预处理、后处理检测方案,提高检测概率。例如:文献[8]提出的一种双

级检测算法,在极度非均匀的环境下能收到良好的检测效果。

#### (4) 回波存在主瓣多普勒模糊时的检测

高分辨宽测绘带(High Resolution Wide Swath, HRWS)成像模式与 GMTI 对 PRF 的要求相互矛盾。在 HRWS 与 SAR-GMTI 兼容工作模式下,回波会由于 PRF 低于多普勒带宽而产生方位向模糊,为避免与 PRF 的截断效应造成的模糊(副瓣多普勒模糊)相混淆,将其称为主瓣多普勒模糊。

对低 PRF 时存在杂波主瓣模糊的情况,常见的处理方式是根据图像域杂波与目标的导向矢量不同,使用波束形成的方式将模糊后的杂波抑制掉。但是,这种成像后检测方法的缺陷是动目标会有一些的积累损失。当 PRF 较低时,动目标的多普勒中心超出基带使得损失进一步加重。Dragosevic 等人<sup>[9]</sup>提出,利用几个多普勒中心频率不同的参考函数分别成像可以解决这一问题。Cerutti-Maori 等人<sup>[10]</sup>在此基础上,进一步用自适应匹配滤波完成杂波抑制,然后以信噪比改善因子最大为准则对目标结果进行筛选后再完成目标检测与参数估计,对于减轻目标积累损失也很有效。

## 4 分布式 SAR-GMTI 系统

### 4.1 基本概念

分布式 SAR-GMTI 这一概念是多通道 SAR-GMTI 的延伸。与将单个天线划分为多个通道的思路不同,分布式系统将多个接收天线分别放置于多个运动平台上,组成稀疏的雷达阵列,从而可以突破天线口径的限制,提供更长的顺轨基线,进而显著提升慢速运动目标的检测性能。另外,通过多个平台运动轨迹的灵活设置,可以产生长短结合的基线,消除盲速。

梁甸农等人<sup>[11]</sup>于 2009 年对分布式星载 SAR-GMTI 系统进行了较为全面的总结,本节在其基础上针对近年来在分布式星载 SAR-GMTI 方向的研究热点进行简要介绍。

### 4.2 轨道高度设计

目前在轨的 SAR 卫星多为低轨(Low Earth orbit, LEO),其优点是卫星尺寸及功率较小,成本低,利于高分辨成像;缺点是卫星回访周期长(Radarsat-2 的回访周期约为 2 天),单颗卫星的覆盖率较小,目标跟踪时间有限,并且受空间弹道导弹、激光武器的威胁,战场生存能力有待考验。

近几年正在发展的中轨(Medium Earth Orbit, MEO)、高轨(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)卫星则可以以较少的卫星数量完成全球覆盖,且回访周期短;在信号处理层面上,较长的合成孔径时间利于抑制噪声;战场环境中,可以完成对大面积区域持续监测的任务。其缺点为:包括电磁辐射、传播损耗等在内的空间环境更加复杂;功耗大,成本高;对天线的尺寸、材质、展开技术等要求更高;大视场中的等效斜距、等效速度存在空变性,相关的处理技术尚不成熟。

目前较为合理的办法是采用组合轨道。美国在“Future Space Based Radar”计划中提出了“GEO+MEO”双基地雷达以及“GEO+无人机”双基雷达等概念,发射机位于中高轨卫星上,接收机搭载在低轨卫星、飞机或者浮空器平台上。这样的组合方式可以减少卫星发射数量,接收端具有良好的机动性,被动接收方式易躲避敌方侦查,在信号处理层面,与机载双基系统相比,杂波对距离的依赖性低,可以得到较好的抑制。

### 4.3 编队构型设计

设计卫星编队构型主要考虑以下几个方面:

(1)从 GMTI 功能角度考虑,提供长短结合的基线,可以兼备长基线的测速精度高与短基线的盲速数目少,并为系统提供更多的空间自由度,利于杂波抑制。

(2)从成本上考虑,编队构型要稳定,易于维持,不消耗过多燃料;最好是在原有卫星基础上增加新星,充分利用现有的卫星资源。

目前的分布式构型大致可以分为 3 类:线阵、面阵、立体构型。其中的立体构型可以同时完成动目标检测与三维测高,迎合了多功能集成的发展趋势,是主要的研究方向。文献<sup>[12]</sup>对比分析了几种可提供 SAR-GMTI 功能的典型卫星编队方式,即 Cart Wheel、Pendulum、Carp 及 SAR-train 等。国防科技大学先后提出了基于信号正交原理的沿航向编队基线优化配置方法和基于遗传算法的立体编队优化方法,哈尔滨工业大学提出了基于双站扩展空时模型(BESTIM)的最优编队构型设计<sup>[13]</sup>。

总体上,与更为成熟的 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)测高相比,SAR-GMTI 系统在编队与基线设计方面的研究较少。

### 4.4 分布式星载 SAR-GMTI 检测性能影响因素

现将影响 SAR-GMTI 检测性能的因素罗列于图 3 中,其中红色部分为分布式星载系统需要特殊考虑的。

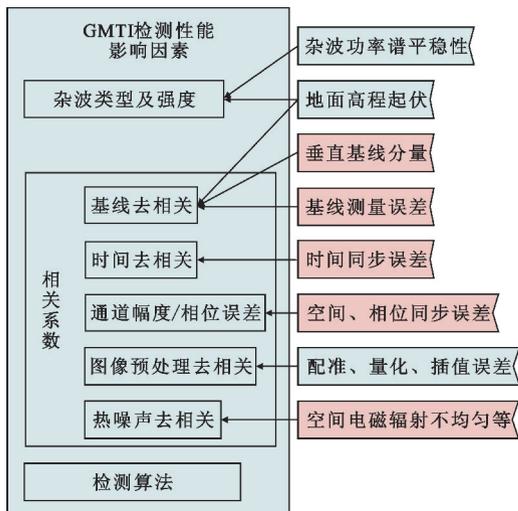


图3 影响分布式星载 SAR-GMTI 系统检测性能的因素  
Fig. 3 Factors influencing the detection performance of distributed space borne SAR-GMTI system

### (1) 基线长度与姿态角

对于 GMTI 功能来说,有用的是沿航迹基线。对有效基线长度的估计偏差,会直接传递到动目标径向速度的估计上。基线姿态角非零,即说明存在切航向基线,若同时存在地形高程起伏,则会对图像相关性产生很大影响。文献[12]对基线姿态角和地面坡度造成的图像相关性下降做了定量分析。

西安电子科技大学陆续提出了几种基线估计方法:文献[14]系统地讨论了产生基线估计误差的原因,重点分析多普勒混叠的影响,并提出一种有效基线估计算法;文献[15]针对卫星基线斜置的情况,探究系统约束条件的变化及等效相位中心补偿因子的设计,提出一种基于星历和回波数据的沿航向基线计算方法;针对时变基线,提出将回波数据通过航迹拟合和相位补偿等效为固定基线回波。

### (2) 时、空、相同步误差

在存在切航向基线、地形起伏的情况下对干涉相位误差影响较大,使得使用自适应滤波法时采集到的样本不满足独立同分布(Independent and Identically Distributed, IID)条件,目标导向矢量失配,杂波抑制效果下降。目前的解决办法除了在硬件上提高同步精度之外,主要是借助数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)对高度变化进行补偿,并在目标像素附近分块取样,尽量提高杂波协方差矩阵估计的准确性。

### (3) 杂波抑制与目标检测算法设计

分布式平台相互之间存在同步误差,且观测视角差异较大,通道一致性较差,因此有必要研究更加

稳健的图像配准、杂波抑制和参数估计算法。文献[16]提出一种对图像配准误差稳健的检测算法;文献[17]使用基于自适应重构和子空间投影的径向速度估计算法,对图像配准误差和通道相位误差具有良好的稳健性。

此外,分布式星载 SAR-GMTI 系统在总体参数设计、机械结构设计等方面也有很多问题亟待研究。

## 5 基于 MIMO 的 SAR-GMTI 系统

### 5.1 基本概念

MIMO 最早应用于通信领域,其核心思想为发射/接收分集和空间复用。2003 年,美国林肯实验室的 Bliss 等人<sup>[18]</sup>将这一概念引申至雷达领域,指使用多个发射天线、多个接收天线同时工作的雷达。2007 年, Ender<sup>[19]</sup>将 MIMO-SAR 定义为“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”。

具备 SAR-GMTI 功能的 MIMO 雷达(以下简称 MIMO SAR-GMTI 雷达)具备以下特点:属于相参 MIMO 雷达,发射阵元(和接收阵元)之间的间距较小,使目标满足远场条件,可以通过长时间的相参脉冲积累获得较高的速度分辨率;利用全部收发组合,根据多相位中心合成原理实现较大的虚拟阵列孔径。

下面以图 4 为例说明 MIMO-SAR 雷达的多相位中心合成原理。传统的单发多收(Single-input Multiple-Output, SIMO)多通道雷达,由  $N$  个接收通道可以产生  $N$  个相位中心,而  $N$  发  $N$  收的相参 MIMO 雷达在一个脉冲重复周期内可产生  $2N-1$  个等效相位中心,且等效阵列长度也增加了近 1 倍。

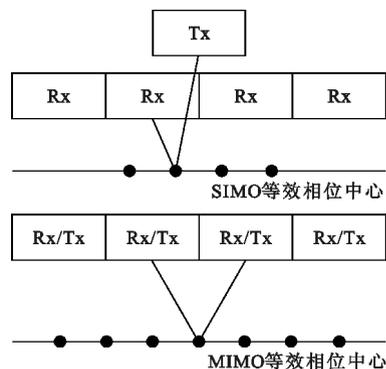


图4 相参 MIMO 雷达与 SIMO 雷达等效的虚拟阵列示意图 ( $N=4$ )

Fig. 4 A sketch of the equivalent virtual array for coherent MIMO radar and SIMO radar, where  $N=4$

## 5.2 MIMO SAR-GMTI 系统的优势

与传统雷达相比, MIMO-SAR 雷达具有较高的自由度和较长的相干积累时间, 在对慢速弱目标进行检测时具有以下优势:

### (1) 提升了杂波抑制性能

SAR-GMTI 系统多用改善因子即输出与输入信号-信道噪声比 (Signal-to-Channel Noise Ratio, SCNR) 来衡量系统的杂波抑制性能。一方面, 与脉冲多普勒体制的 GMTI 雷达相比, MIMO-SAR 雷达通过长时间脉冲积累可以获得较高的分辨率, 在更小的分辨单元中的杂波和噪声能量减少, 动目标能量几乎不变, 输出 SCNR 提高, 杂波抑制效果更好; 另一方面, 与单发多收的多通道 SAR-GMTI 系统相比, MIMO-SAR 雷达具有更长的虚拟阵列孔径和更多的自由度, 通过在发射或者接收端使用 DBF 技术, 可以自适应的滤除杂波。该特点为弱目标在复杂地形和城市背景等复杂环境下的杂波抑制提出了一种解决办法。

### (2) 降低了 MDV

SAR-GMTI 系统的最小可检测速度受检测概率、虚警概率、通道一致性、目标 SCNR 等诸多因素共同影响。前文已阐明 MIMO SAR-GMTI 通过长 CPI 和大虚拟阵列可以获得更高的 SCNR, 因此, 在环境和用户条件相同的情况下, MIMO SAR-GMTI 的 MDV 更小。图 5 展示了 MIMO 与 SIMO 输出 SCNR 与目标速度的关系, 可以看到在目标速度相同的情况下, MIMO 雷达比 SIMO 雷达的输出 SCNR 更高, 更适用于慢速运动目标检测。

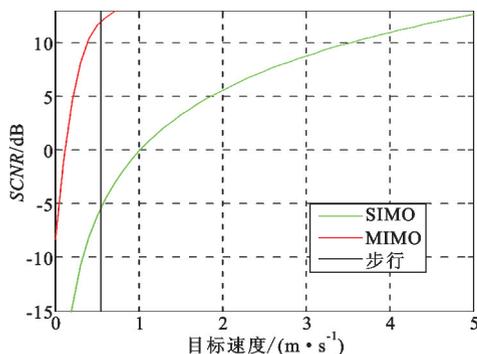


图 5 MIMO 与 SIMO 系统中输出 SCNR 随目标速度的变化

Fig. 5 A comparison of the SCNR loss versus target velocity between MIMO and SIMO system

## 5.3 MIMO-GMTI 系统研究热点

### 5.3.1 天线阵列设计

MIMO 天线阵元排布方式决定了空间采样特性

和后续信号处理的复杂程度, 多个发射天线在提供了更多的空间自由度的同时也提升了计算复杂度, 因此需要根据系统功能进行优化设计。文献[20]提出了“折衷自由度”的概念和线性阵列最优构型, 并针对 SAR 成像和 GMTI 两种功能提出了不同的自由度分配方案。

MIMO 系统的发射天线与接收天线可以搭载于同一平台也可以分置于不同平台上。对于收发共置型天线, 可以使用空间卷积逆运算或者相位中心近似 (PCA) 原理来求解阵元位置。对于收发分置天线, 由于收发天线位置影响, 存在多种设计方案, 主要依靠经验进行选取, 近年来研究成果不多。

### 5.3.2 发射波形设计与接收信号分选

Forsythe 等人在文献[21]中比较了不同发射波形在杂波抑制后信噪比的下降情况, 指出使用 DDMA (Doppler-Division Multiple Access) 信号可使杂波抑制造成的信噪比下降逼近理想值。Kantor 等人<sup>[22]</sup>从杂波协方差矩阵秩最小化的角度, 得出 DDMA、TDMA (Time Division Multiple Address) 可保证杂波协方差矩阵的秩恒为 1, 是较为理想的发射波形, 然而需考虑其较高的脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF) 引起距离模糊的问题。Gerhard<sup>[23]</sup>提出了一组短期移位正交波形, 在 SAR 发射端的不同子阵上使用不同波形, 可避免空间分布紧凑的散射点回波之间产生相互干扰。

SAR 分布场景回波经匹配滤波之后相互干扰会造成回波质量下降。Gerhard<sup>[23]</sup>提出在接收端使用 DBF 技术, 将回波在垂直向进行分离, 用于去除远距离处散射点的干扰。Zatman 在文献[24]中也指出通过在垂直方向上使用高自由度大孔径, 并结合三维 STAP 算法可有效分离和抑制近距离处的距离模糊杂波。

### 5.3.3 杂波抑制与目标检测算法

目前对基于 MIMO 的 GMTI 系统的研究更多的集中在脉冲多普勒体制, 对 MIMO-SAR 成像体制的 GMTI 相对较少。

文献[25]对宽测绘带的 MIMO-SAR 回波进行分析, 指出等效观测通道会使匀速运动目标产生“等效微动效应”。文献[26]利用 MIMO-SAR 系统提供的方位向多通道和正交波形分集, 提出一种联合处理方案, 使用双干涉处理估计运动目标的顺轨速度, 使用 SFrFT 算法估计其他多普勒参数, 最终获得目标的位置、速度以及高分辨 SAR 图像信息。Sjogren<sup>[27]</sup>对 UHF 频段的 MIMO-SAR 回波使用空时

自适应滤波和双级 FBP 聚焦处理,先估计参数再聚焦,有效抑制了叶簇杂波,提高了动目标能量。

#### 5.4 关于 MIMO-GMTI 系统的争议

当然,作为新生事物,MIMO 雷达的性能也是备受争议。

##### (1) 杂波距离模糊

以 TDMA 和 DDMA 为代表的波形复用技术使得系统需要比传统 GMTI 更高的脉冲重复频率,进而导致一个相干积累时间段内出现杂波距离模糊<sup>[21,28]</sup>,致使 GMTI 性能下降。目前的 MIMO-GMTI 较适于近/中距离目标检测。

##### (2) 实际工程实现

Brookner 指出在现有的将 MIMO 与传统雷达的比较中,无法保证阵列结构等参量的一致性,这样的比较没有意义。Daum 等人<sup>[29]</sup>对 MIMO 雷达在成本、系统复杂度、计算量、目标长时间跟踪等实际工程实现措施提出质疑。

## 6 展望

综合考虑当前技术发展方向与多元化的应用需求,SAR-GMTI 系统将有以下几个发展趋势:

##### (1) 多轨道、多基地分布式系统

分布式系统,尤其是星机双多基系统可以将星载平台覆盖区域广、机载平台灵活、抗打击等优势结合起来,同时折衷考虑了卫星发射成本高、飞机持续工作时间短的缺陷。另外,无人机编队的灵活性高、成本低,也成为被中外学者看好的平台。

目前,高低轨双多基和星机双多基系统面临的主要问题是不同轨道上平台运行速度差别较大,同步问题难以解决,且共同照射时间短,有效脉冲积累时间不足。

##### (2) 多功能集成

以 HRWS 成像模式和 GMTI 模式为例,两者的矛盾在于:为避免距离模糊、提高测绘带宽应使 PRF 尽量低,而受方位向分辨率和地杂波多普勒带宽的限制,PRF 应该尽量高。多通道子孔径接收的工作方式使杂波多普勒频带变宽,更增加了系统中 PRF 的设计压力。理论上,将  $M \times N$  的 MIMO 系统等效为  $M$  个 1 发  $N$  收的通道,可以达到使用单通道的 PRF 完成多通道的动目标检测效果。通过选择合适的 PRF 平衡两个系统的性能,达到 HRWS SAR 成像与 GMTI 的兼顾是可以实现的。

MIMO 技术缓和了 HRWS 模式与 GMTI 模式在

系统参数设计上的矛盾,分布式平台使得系统便于完成干涉测高的任务。将来有希望实现将 HRWS 模式、GMTI 模式与三维高程测量模式等集于一体,根据实际需求转换工作模式,降低系统成本。

##### (3) 先进的工作模式

合理的工作模式结合相应的信号处理方法可有效提升 SAR-GMTI 系统的性能。

TopSAR 模式可以有效提升测绘带宽并且避免 ScanSAR 模式的扇贝效应。中国科学院电子所齐向阳<sup>[30]</sup>提出了一种星载 TOPSAR 广域监视 GMTI 方法,改善了 ScanSAR 在星载条件下的低信杂比和信噪比问题;速度 SAR (VSAR) 能够对目标场景进行三维(距离/方位/速度)重建,在理论上对低 RCS、慢速目标检测效果较好;频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)可以产生具有距离-角度二维依赖性的发射方向图,在提高 SAR-GMTI 系统的图像分辨率、解除距离模糊、提升抗干扰性能等方面具有较大潜力,电子科技大学的王文钦在文献[31]中做了较为全面的总结。

基于压缩感知理论的稀疏采样 SAR 系统可以减小宽带雷达所面临的超大数据量的问题,文献[32]综述了使用稀疏重构实现 SAR 成像的可行性及面临的问题;文献[33]使用距离徙动算法对 MIMO-SAR 回波进行预处理,在接收端使用压缩感知算法进行成像,以解决回波数据量过大的问题;文献[34]中提出将压缩感知理论与 ScanSAR 模式相结合,即采用时分复用的方式将稀疏采样所节省的时间分配到不同的观测区域,以扩大测绘带宽;文献[35]推导了基于压缩感知的双通道 SAR-GMTI 方法。虽然基于压缩感知的 SAR-GMTI 系统具备了一定的理论基础,但仍存在许多问题,诸如伪随机波束指向照射及接收技术、低信噪比重构算法等。

##### (4) 多域融合,智能感知

合成孔径雷达通过地物的电磁散射波对目标进行成像,利用不同频率、不同极化及不同入射角的电磁波对地物进行观测,能够得到更加丰富的地物信息。另外,SAR-GMTI 系统与光学遥感平台、地面交通网等的融合,可以充分利用其他平台提供的先验知识,降低运算复杂度,提高目标跟踪检测精度,对将来智能感知雷达的实现具有一定的价值。

## 参考文献:

- [1] SOUMEKH M. Moving target detection and imaging using an X band along-track monopulse SAR[J]. IEEE Trans-

- actions on Aerospace & Electronic Systems,2002,38(1):315-333.
- [2] 李真芳,保铮,杨凤凤. 基于成像的分布式卫星 SAR 系统地面运动目标检测(GMTI)及定位技术[J]. 中国科学 E 辑,2005,35(6):597-609.  
LI Zhenfang, BAO Zheng, YANG Fengfeng. Groundmoving target identification and location technique based on distributed SAR imaging system[J]. Science in China (Series E),2005,35(6):597-609. (in Chinese)
- [3] 张卫华,赵宁,张长耀,等. 机载 SAR/GMTI 雷达系统实现及飞行试验[C]//第八届全国雷达学术年会. 合肥:中国电子学会,2002:484-487.
- [4] SUCHANDT S, EINEDER M, MULLER R, et al. Development of a GMTI processing system for the extraction of traffic information from TerraSAR-X Data[C]//Proceedings of 2006 European Conference on Synthetic Aperture Radar. Dresden, German:IEEE,2006:186-187.
- [5] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2013,51(1):560-572.
- [6] 王永良,李天泉. 机载雷达空时自适应信号处理技术回顾与展望[J]. 中国电子科学研究院学报,2008,3(3):271-275,296.  
WANG Yongliang, LI Tianquan. Overview and outlook of space time adaptive signal processing for airborne radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008,3(3):271-275,296. (in Chinese)
- [7] ENDER J H G. Subspace transformation techniques applied to multi-channel SAR/MTI[C]//Proceedings of 1999 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg, German:IEEE,1999:38-40.
- [8] LIU B C, YIN K Y, LI Y K, et al. An improvement in multichannel SAR-GMTI detection in heterogeneous environments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2015,53(2):810-827.
- [9] DRAGOSEVIC M V, CHIU S. Space-based motion estimators-evaluation with the first RADARSAT-2 MODEX data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009,6(3):438-442.
- [10] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2013,51(1):560-572.
- [11] 梁甸农,蔡斌,王敏,等. 星载 SAR-GMTI 研究进展[J]. 国防科技大学学报,2009,31(4):87-92.  
LIANG Diannong, CAI Bin, WANG Min, et al. Research process of spaceborne SAR-GMTI systems[J]. Journal of National University of Defense Technology,2009,31(4):87-92. (in Chinese)
- [12] 杨凤凤. 星载雷达 GMTI 系统与信号处理研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.  
YANG Fengfeng. Spaceborne radar GMTI system and signal processing research[D]. Changsha:National University of Defense Technology,2007. (in Chinese)
- [13] 李晨雷. 分布式 SAR 动目标成像关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.  
LI Chenlei. Research on key techniques of moving target imaging with distributed SAR[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2015. (in Chinese)
- [14] LIU B C, WANG T, LI Y K, et al. Effects of Doppler aliasing on baseline estimation in multichannel SAR-GMTI and solutions to address these effects[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(10):6471-6487.
- [15] 束宇翔. 分布式卫星多相位中心 SAR-GMTI 技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.  
SHU Yuxiang. Research on techniques of SAR-GMTI for distributed satellite SAR system with multiple phase centers[D]. Xi'an:Xiidian University,2014. (in Chinese)
- [16] SUO Z, LI Z, BAO Z. Multi-channel SAR-GMTI method robust to coregistration error of SAR images[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2010,46(4):2035-2043.
- [17] SHU Y X, LIAO G S, YANG Z W. Robust radial velocity estimation of moving targets based on adaptive data reconstruction and subspace projection algorithm[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2014,11(6):1101-1105.
- [18] BLISS D W, FORSYTHE K W. Multiple-input multiple-output(MIMO) radar and imaging:degrees of freedom and resolution[C]//Proceedings of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, California:IEEE,2003:54-59.
- [19] ENDER J. MIMO-SAR[C]//Proceedings of 2007 International Radar Symposium. Cologne, German:IEEE, 2007:580-588.
- [20] WANG L B, XU J, PENG S B, et al. Optimal linear array tradeoff for configuration and DOF MIMO-SAR[J]. Chinese Journal of Electronics,2011,20(2):380-384.
- [21] FORSYTHE K W, BLISS D W. MIMO radar waveform constraints for GMTI[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2010,4(1):21-32.
- [22] KANTOR J M, BLISS D W. Clutter covariance matrices for GMTI MIMO radar[C]//Proceedings of 2010 Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). Pacific Grove, California:IEEE,2010:1821-1826.
- [23] GERHARD K. MIMO-SAR:opportunities and pitfalls[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013,52(5):1-18.
- [24] ZATMAN M. The applicability of GMTI MIMO

- radar[C]//2010 Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). Pacific Grove, California; IEEE, 2010; 2138-2142.
- [25] 谢超,王力宝,王党卫,等. 宽测绘带 MIMO-SAR 运动目标回波特性分析[J]. 红外与激光工程,2014,43(9):2860-2866.  
XIE Chao, WANG Libao, WANG Dangwei, et al. Analysis of moving target echo characteristics of wide-swath MIMO-SAR[J]. Infrared & Laser Engineering, 2014, 43(9):2860-2866. (in Chinese)
- [26] 张晓光,刘祥峰,付琨,等. 基于 MIMO-SAR 体制的空频域自适应动目标检测技术研究[J]. 电子与信息学报,2010,32(8):1997-2001.  
ZHANG Xiaoguang, LIU Xiangfeng, FU Kun, et al. Study on ground moving target indication of multiple input multiple output space-borne SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(8):1997-2001. (in Chinese)
- [27] SJOGREN T K, VU V T, PETTERSSON M, et al. Suppression of clutter in multichannel SAR GMTI[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7):4005-013.
- [28] BLISS D W, FORSYTHE K W. Stone soup MIMO radar; comparing sparse partially adaptive and MIMO GMTI radars[C]//Proceedings of 2003 IEEE Radar Conference(RADAR). Ottawa; IEEE, 2013:1-6.
- [29] DAUM F, HUANG J. MIMO radar: snake oil or good idea[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2009, 24(5):8-12.
- [30] 曾祥杰,齐向阳. 基于斜视 TOPSAR 的星载区域监视 GMTI 方法研究[J]. 雷达学报,2015,4(4):401-410.  
ZENG Xiangjie, QI Xiangyang. Spaceborne regional surveillance ground moving target indication based on squint-TOPSAR[J]. Journal of Radars, 2015, 4(4):401-410. (in Chinese)
- [31] 王文钦,邵怀宗,陈慧. 频控阵雷达:概念、原理与应用[J]. 电子与信息学报,2016,38(4):1000-1011.  
WANG Wenqin, SHAO Huaizong, CHEN Hui. Frequency diverse array radar: concept, principle and application[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016, 38(4):1000-1011. (in Chinese)
- [32] POTTER L C, ERTIN E, PARKER J T, et al. Sparsity and compressed sensing in radar imaging[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6):1006-1020.
- [33] 谢矿生. 基于回波数据压缩的 MIMO-SAR 成像方法[J]. 电讯技术,2015,55(3):233-237.  
XIE Kuangsheng. An imaging method of MIMO-SAR with compressed echo data[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(3):233-237.
- [34] LIU D, BOUFONOS P T. High resolution scan mode SAR using compressive sensing[C]//Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). Tsukuba, Japan; IEEE, 2013:525-528.
- [35] WANG W, ZHU Y, ZHAO H, et al. Clutter suppression and GMTI with sparse sampled data for dual-channel SAR[C]//Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference. Cincinnati, Ohio, USA; IEEE, 2014:280-284.

#### 作者简介:



林晨晨(1991—),女,山东德州人,2014年于哈尔滨工业大学获工学硕士学位,现为中国空间技术研究院西安分院博士研究生,主要研究方向为多通道 SAR 系统设计、SAR/ISAR 信号处理、动目标检测等;

Email:daisy\_0612@hotmail.com

黄普明(1971—),男,陕西西安人,中国空间技术研究院西安分院研究员、博士生导师,主要从事研究方向为数据传输与处理、航天器通信技术;

李渝(1988—),男,河南南阳人,博士研究生,主要研究方向为动目标检测与跟踪、非线性滤波、雷达成像等。