

合成孔径雷达微动目标指示(SAR/MMTI)研究进展

邓 彬^{1,2}, 吴称光¹, 秦玉亮¹, 黎 湘¹, 王宏强¹

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南长沙 410073; 2. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 目标微动蕴含着对合成孔径雷达(SAR)图像解译极为有利的特征和信息,同时也造成 SAR 成像模糊等不利影响.近年来,SAR 目标微动影响分析、微动目标检测、估计、成像等技术正成为当前遥感领域新兴的研究方向.本文将上述技术统称为 SAR 微动目标指示(SAR/MMTI),对 SAR/MMTI 概念、科学问题、试验情况、理论进展、应用前景等方面做了比较深入的介绍和分析,最后对 SAR 目标微动研究的发展趋势进行了预测.

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 微动; 微多普勒; 振动; 转动; 动目标指示

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2013)12-2436-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.018

Advances in Synthetic Aperture Radar Micro-Motion Target Indication(SAR/MMTI)

DENG Bin^{1,2}, WU Cheng-guang¹, QIN Yu-liang¹, LI Xiang¹, WANG Hong-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Changsha, Hunan 410073, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Target micro-motion conveys vital information which is favorable for understanding synthetic aperture radar (SAR) images. However, image defocusing also ensues. Therefore, techniques on micro-motion effect analysis, micro-motion target detection and imaging are gaining more and more attentions in the remote sensing field. These techniques are generally named SAR/micro-motion target indication (SAR/MMTI). In this paper, topics on SAR/MMTI are introduced including its concept, key difficulties, existing experiments, processing approaches, and its application promise. Some directions of future work on SAR micro-motion are predicted at last.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); micro-motion; micro-Doppler; vibration; rotation; moving target indication (MTI)

1 引言

SAR 地面运动目标指示(SAR/Ground Moving Target Indication, SAR/GMTI)技术是探测匀速和匀加速运动目标的有力手段.然而,探测区域中往往还大量存在一些微动目标,如旋转的天线、振动的车辆引擎、悬停直升机的旋翼等.目标微动蕴含着反应目标身份标识的精细特征,提取后对 SAR 图像解译非常有利.例如,通过提取引擎、履带或车轮的微动特征有望使 SAR/GMTI 系统具备运动车辆识别能力.但是,微动不能用低阶模型近似,不利于运动目标信息的长时间积累,同时使回波多普勒产生非线性或周期性微多普勒调制,使 SAR 图像出现非对称畸变甚至“鬼影”.对此,传统的 SAR/GMTI 技术难以解决.

因此,近年来 SAR 目标微动研究——包括 SAR 目标微动影响规律、SAR 微动目标检测成像等——正逐渐成为遥感领域的热点,涌现出一批研究成果.其中 SAR 振动目标检测内容被 2008 新出版的《雷达手册》第三版收录.我们从 2006 年开始跟踪这一方向,并将上述研究统称为 SAR 微动目标指示(SAR/MMTI),作为 SAR/GMTI 技术的推广.本文将对 SAR/MMTI 技术进行梳理总结,介绍近年来取得的主要进展,探讨未来发展趋势.

2 SAR/MMTI 概述

2.1 定义

微动是对目标或目标组成部分在雷达径向的小幅往复性运动或运动分量的统称,例如行人手和腿的摆动、桥梁/怠速车辆/飞机/船体/导弹/空间站的振动、天

线的转动、电动机的转动等. 尽管 SAR/GMTI 概念自身并未局限于目标运动形式, 但传统的 SAR/GMTI 技术仅针对匀速或径向加速运动目标, 并未考虑也不适用于微动目标. 微动将导致目标回波的相位历史发生畸变, 造成多普勒调频时变, 信号频谱展宽. 这种现象称为微多普勒效应. 目标微动对杂波抑制与运动目标检测、RCMC、参数估计和成像均产生影响, 使传统的 SAR/GMTI 算法失效. 例如, RCMC 中常用的 Keystone 变换仅适合于校正目标的匀速运动, 一体化成像中的等效运动法也只能对匀速运动目标聚焦. 然而, 目标微动形式普遍存在于客观的世界, 往往蕴含着对 SAR 图像解译和目标识别较为有利的稳定信息, 故微动目标逐渐进入到 SAR 研究人员的视野. 另一方面, 近年来在 SAR 体制下对于转动、振动等运动已分别进行了研究, 在这种环境下, 抽取这些运动形式共有的本质属性, 形成针对此类目标统一的影响分析理论和处理框架是很有必要的. 因此, 我们于 2009 年在 IET 国际雷达会议上正式提出了 SAR/MMTI 概念^[1].

定义 SAR/MMTI 是一种能够检测地面、海面或低空微动或包含微动分量的目标, 估计其参数, 并将其标注或聚焦在 SAR 图像上的合成孔径成像雷达或技术.

可见, SAR/MMTI 内涵是指微动目标的检测、参数估计与成像技术或实现该技术的雷达. 针对的地海目标运动形式包括: 振动、转动、蛇形运动、摆动、摆臂、随机运动等以及上述运动的组合. 注意振动可能包含多个振动频率. 此外空间目标的自旋、进动等不在考虑范畴, 地面植被晃动、海浪运动等自然现象更多属于杂波, 也不属于 SAR/MMTI 研究对象.

SAR/MMTI 之所以以前未受重视, 一方面是受限于技术的水平. 地面目标运动速度相对于平台一般较小, 脉冲积累时间也不长, 再加上分辨率也不够高, 即目标运动可看成匀(加)速运动, 微多普勒效应并不明显. 即使存在也难以检测, 只能当成雷达目标噪声. SAR/MMTI 目的即是把目标噪声作为有用的信息进行提取. 随着雷达和信号处理技术的发展, 这种提取逐步成为可能. 另一方面也是因为受限于应用的需求. SAR 多数情况下只是用来获得静止场景的图像, 或用来对慢速运动目标进行检测和成像. 当时还没有这种对目标部件精细化探测的需求. 此外, SAR/MMTI 也可用于干扰对抗, 而当时的 SAR 干扰对抗环境也相对简单, 尚未突显这方面需求.

2.2 与 SAR/GMTI 的区别和联系

SAR/MMTI 与 SAR/GMTI 所研究的对象具有不同的多普勒时变特性. 以条带 SAR 为例, 画出方位去斜前各种运动目标回波多普勒历程, 如图 1 所示. 可见微动目标呈现出正弦调频(Sinusoidal Frequency Modulation, SFM)

信号特点, 具有明显的相位周期性, 与匀速和加速运动目标形成鲜明的对比, 因此从信号处理的角度看所采用处理手段也不再基于 LFM 信号, 而是 SFM 信号. 当然, 相应的 SAR 图像特征也全然不同. 需要说明的是, 尽管(变)加速运动不属 SAR/MMTI 研究范畴, 但在目标旋转较慢以致积累时间内可以近似成加速运动时目标仍呈现出加速运动的特性.

另外, 如果说 SAR/GMTI 本身并未限制目标运动类型, 则 SAR/MMTI 与传统 SAR/GMTI 都是广义 SAR/GMTI 的子集. 顺便说明, 广义 SAR/GMTI 与 SAR/FTI(固定目标指示, APY-3 雷达中采用的概念)是并列关系.

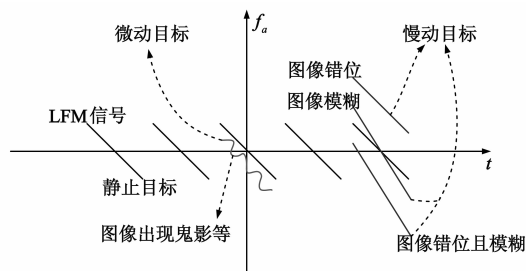


图1 微动和慢动(匀速、加速)目标SAR回波多普勒历程

2.3 与 ISAR 微动研究的区别和联系

逆合成孔径雷达(Inverse SAR, ISAR)微动目标成像已有不少研究, 而且从相对运动来看与 SAR/MMTI 也很相似, 对回波信号进行微多普勒分析的技术也都通用, 但是, ISAR 一般面对背景纯净的天空, 而 SAR 则需面对产生强背景杂波干扰的地面或海面, 杂波对动目标检测、RCMC 和运动参数估计等都有极其不利的影响. 杂波的存在是 SAR 与 ISAR 微动目标成像技术最根本的区别. 另外一点区别是: ISAR 可以利用目标微动进行成像, 而 SAR 通常需要消除目标微动才可成像.

2.4 科学问题

(1) 雷达层面

SAR/MMTI 的难点源于强背景杂波、复杂而微小的目标运动和非理想散射. 其中非理想散射是指目标旋转导致姿态剧烈变化从而引起各向异性甚至正侧闪烁. 具体地讲, SAR/MMTI 应当围绕以下科学问题进行研究: 微动对 SAR 调制机理与影响分析、杂波抑制与目标检测、目标微动辨识、距离徙动校正、信号分离、多目标多频率分量下的瞬时频率与微动参数估计、多普勒解模糊、低信杂/噪比下的微动目标散射中心估计.

(2) 信号处理层面

SAR/MMTI 可以类化为低信杂/噪比下多分量调幅-调频 SFM 信号检测估计和 SFM-谐波信号分离问题.

(3) 数学层面

SAR/MMTI 最终可以类化为非线性逆问题理论和群论(李群描述微动, Mobius 群描述微多普勒)中的基本问题.

3 SAR/MMTI 历史与现状-系统/试验层面

3.1 美国 Lynx(山猫)雷达

2010 年 10 月新墨西哥大学利用 Ku 波段机载 Lynx 雷达进行了探测振动角反射器的实验^[2]. 角反射器振幅 3mm, 振动频率 5Hz, SAR 分辨率 $0.3 \times 0.3\text{m}$, PRF 270Hz, 积累时间 1s. 在 SAR 图像上观测到了振动目标的鬼影特征(图 2), 采用分数傅里叶变换估计各段子孔径中的目标振动加速度, 插值后积分得到振动速度序列, 进一步傅里叶变换后估计得到振动频率.

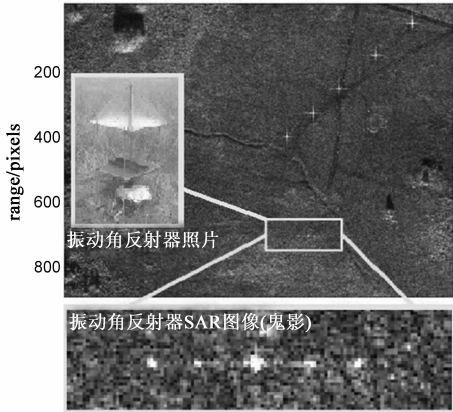


图2 Lynx雷达所成振动角反射器目标SAR图像

3.2 美国 Norden 系统

Northrop-Grumman 公司利用 Norden 系统获取了一幅包含振动目标的 SAR 图像(图 3), 时间不详. 目标为怠速卡车, 可见卡车包含两个振动频率, 相应产生了两组成对回波(鬼影).

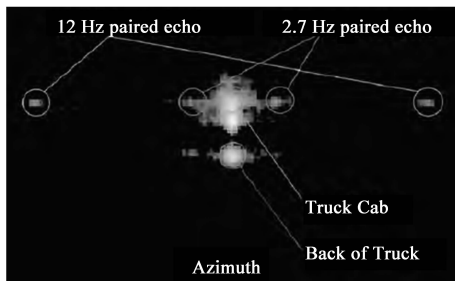


图3 包含振动目标的SAR图像

3.3 美国 AN/APY-6 雷达

AN/APY-6 雷达除了具有慢速运动目标检测功能外, 还是世界上第一部能够对地面转动天线进行检测和定位的雷达. 美国海军曾利用该雷达进行过探测旋转雷达天线和振动角反射器的试验.

在 2000 年左右利用在 NP-3 飞机上搭载的 APY-6 雷达进行了探测地面旋转雷达天线目标的试验^[3,4], 雷达中心频率为 9.65GHz(X 波段), PRF 为 1200Hz, 带宽为 150MHz. 天线旋转周期为 4.7s, 天线类型据作者推测为

抛物面天线. 美国海军研究实验室和加拿大国防研发部都对数据进行了分析, 成功检测和分离了目标并估计其参数, 目标旋转周期估计结果为 4.70s 和 4.67s(与分离方法有关). 其中“检测”采用四通道对消方法, “分离”采用小波和 Chirplet 分解方法, “估计”采用自相关方法. 最终将旋转天线准确地标注在 SAR 图像(或地图)上, 如图 4(a)所示.

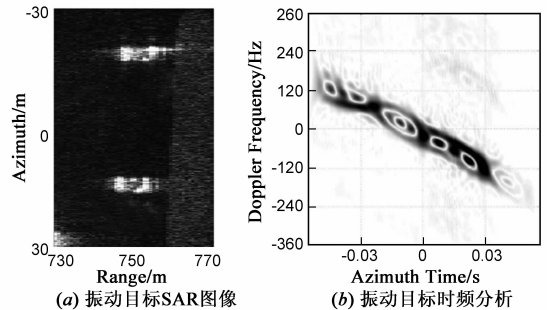


图4 APY-6雷达的微动目标探测试验^[3]

利用 APY-6 雷达还进行了照射振动角反射器目标的试验^[5], 时间不详. 两个角反射器放置于华盛顿附近某半岛上(图 4(b)), 振幅 8mm, 其一以频率 2Hz 做整体振动, 另一角反射器的三个板独立振动, 频率几十赫兹. 获取了含有角反射器的半岛 SAR 图像(图 4(c)). 挪威国防研究中心人员对回波数据进行了时频分析, 观察到了正弦频率调制, 振动频率也可以较准确地估计出来, 但振幅估计误差很大.

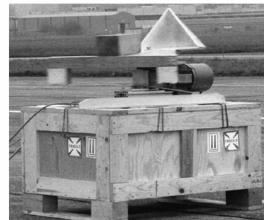
3.4 德国 MEMPHIS 系统

瑞士苏黎世大学遥感实验室于 2005 年利用德国高

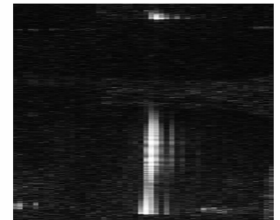


(a) 振动目标SAR图像

(b) 振动目标时频分析



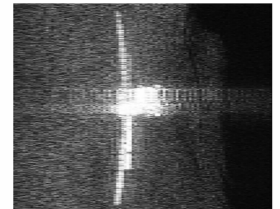
(c) 旋转角反射器照片



(d) 旋转角反射器像



(e) 旋转雷达天线照片



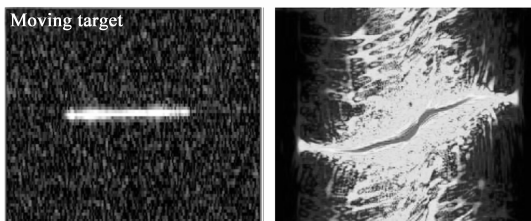
(f) 旋转雷达天线像

图5 振动卡车、旋转角反射器和旋转雷达天线SAR成像

频物理与雷达技术研究所研制的毫米波 SAR 系统 MEMPHIS 进行了测量振动和旋转目标的试验^[6]. MEMPHIS 具有 Ka(35GHz)和 W(94GHz)两个波段,本试验采用 W 波段.由于振动幅度较小(0.1mm),在 SAR 图像上未观测到振动现象,在时频图上可观测到微多普勒但极不明显(图 5(a)、图 5(b)),可见毫米波对微小振动探测能力仍然有限,更高频段(例如太赫兹)原理上对微多普勒更为敏感,微动探测能力更强.对地面旋转角反射器(1Hz,半径 1m)和旋转雷达天线(0.25Hz,半径数米)也分别进行了成像(图 5(c)、图 5(d)).同时做了时频分析,由于转速较慢,仅在时频平面上观测到旋转目标部分周期的正弦频率调制.

3.5 德国 E-SAR 系统

挪威国防研究中心在 2003 年利用德国机载 E-SAR 系统进行了相关试验^[7].E-SAR 系统可工作在 P、L、C 和 X 四个波段,试验中采用 X 波段.目标为在农田小路上做蛇形运动(方位向匀速、距离向振动)的汽车,汽车顶部放置一角反射器以增强散射.目标在 SAR 图像上出现了模糊(图 6(a)),其回波时频分布呈现出“斜线+正弦”频率调制特点(图 6(b)).



(a) 车辆像 (b) 车辆回波时频分布
图6 蛇形运动车辆SAR成像

3.6 其他试验

此外,Sandia 国家实验室发现目标微多普勒在超高分辨(0.1m)GMTI 数据中“可见”,指出其可用于动目标识别^[8].美国宾州 Villanova 大学利用双频 SAR 进行了探测塑料风扇(其一叶片涂覆铝箔材料)的试验^[9],美国 ManTech 公司采用 SAR 进行了探测地面上行人(Discount)摆臂的试验,德国宇航中心(DLR)进行了测量车辆颠簸型振动的试验^[10],西安电子科技大学^[11]和国防科技大学^[12]为验证 SAR 无源干扰效果分别进行了 SAR 照射旋转角反射器的试验.加拿大 Calgary 大学于 2000 年利用机载双通道 Convair(CV)580 SAR 系统研究了车辆变加速运动对 SAR 的影响^[13],尽管该试验严格说来不属 SAR/MMTI 范畴,但对慢速旋转(以致转动可用加速运动近似)目标的研究仍有一定的启发.

综上所述,SAR/MMTI 总体上处于试验阶段.

4 SAR/MMTI 历史与现状-理论/技术层面

国外自 1990 年开始对 SAR/MMTI 进行研究^[14],国

内于 2006 年开始出现相关研究^[15].

4.1 国外研究

1990 年,Werness 研究了目标存在平动和转动时的 SAR 成像问题,指出正弦式平动造成成对回波(Paired Echo, PE)^[14].

1995 年 Carrara 在其经典 SAR 著作中研究了振动目标的 SAR 图像成对回波特点及其检测问题^[16].采用 PFA 进行成像.只有一对成对回波时,其二维像在距离向也呈现展宽.在图像域进行简单的门限检测,检测前对成对回波的两个分量重聚焦,使其锐化以增加检测概率,但图像域的检测性能受到限制.

1998 年,美国 ERIM 研究了 SAR 数据中振动目标的检测和建模^[17],指出振动造成的高频相位误差将在 SAR 图像中形成成对回波.用广义似然比法对振动目标进行检测,用方位回波的循环谱密度来抑制杂波估计振动参数,但前提是假设振动目标不存在 RCM 且距离单元内仅有单个振动点目标,且不进行振动目标重新成像.

2003 年,挪威国防研究中心进行了 SAR 振动目标的微多普勒分析^[18].利用 APY-6 雷达做了试验,用自适应最优核方法正确估计了振动参数,指出时频分析窗口长度的选择至关重要.但未讨论杂波抑制和振动目标重新成像问题.该机构还研究了蛇形运动车辆的 SAR 图像和时频分布特征^[19].

2004 年美国 Virginia 大学研究了旋转目标的聚束式 SAR 图像特征^[20],指出尖桩篱栅形状(实际上就是成对回波)是旋转目标(方位向)SAR 图像的典型特征,该特征可用于目标识别.

2005~2010 年,加拿大国防研发部研究了 APY-6 雷达 SAR 数据中旋转天线目标的旋转频率等参数估计问题^[4,21].采用多通道杂波抑制结合目标多普勒特征分析的方法检测目标,通过小波分解和自适应 Chirplet 分解实现目标静止部件回波和旋转部件回波的分离,利用自相关方法进行旋转周期估计.指出该雷达四通道杂波抑制干涉对消机制的杰出性能是实现旋转天线自动检测的基础.

2005~2007 年瑞士苏黎世大学研究了振动和旋转目标对 mmW SAR 造成的影响^[6],利用平滑伪 WVD 分析了它们的多普勒频率,利用 MEMPHIS SAR 系统进行了实验,指出振动目标成像出现方位鬼影、转动目标成像出现方位模糊和错位.

2006 年加拿大 Calgary 大学研究了目标(匀/变)加速度对双通道 SAR/GMTI 的影响及其检测和补偿方法^[13,22].指出方位向加速度和径向加速度造成三次相位误差,引起图像非对称畸变.用假设检验方法检测加速度的存在并进行拟合和补偿.采用估计瞬时频率

→积分得到瞬时相位→设计相应的匹配滤波器→聚焦成像的思路对这类目标重新成像.但考虑的是简单的单点目标.同年, Baumgartner 研究了车体颠簸振动(0.7~2Hz)造成的竖直向加速度对图像的影响(鬼影和畸变)^[10],指出振动可用于采集路面信息.

2008年,英国 Barber 等人研究了悬停直升机旋翼的 SAR 成像^[23],指出受 Sinc 函数加权的梳状点扩展函数亦即表现在 SAR 图像上的多组“鬼影”是其主要特征.

2008年 Villanova 大学 Yimin Zhang 等人通过仿真和试验研究了旋转风扇叶片双频 SAR 回波的时频分布和频谱特征^[9],分别呈现正弦频率调制和成对回波特征.从实测的时频分布图中可以明显看出正侧闪烁的影响(叶片垂直于雷达视线时散射很强,其他姿态很弱).

2008年 Rigling 根据图像域目标“最聚焦”准则对旋转目标重新成像^[24],目标的转动(用3阶多项式建模)反而有利于提高其在新 SAR 图像中的方位分辨.

2009年, Fasih 给出了微动、随机运动等运动不影响 SAR 图像质量的条件^[25].2009~2011年, Qi Wang 等提出了基于子孔径分数傅里叶变换和子空间方法的瞬时调频率和瞬时频率估计方法^[26].2011年 André 分析了并解释了振动目标 SAR 图像“模糊球”特征^[27],实际上是对 Carrara 鬼影特征的扩展.2012年, Clemente 研究了目标微动对双站 SAR 成像的影响^[28].

4.2 国内研究

2006年以来,国防科技大学系统研究了目标微动对单/多通道 SAR 和 SAR/GMTI 的影响^[15,29]以及微动目标检测、参数估计和成像问题.揭示了微动目标 SAR 图像模糊带、栅栏、蝴蝶结等特征及其形成机理^[30],提出了一系列微动目标检测、成像方法^[31,33],基于提出的混合散射中心模型建立了检测-成像联合实现理论框架^[34],并将贝叶斯理论应用于微动目标 SAR 图像参数化重建^[35].

2008~2009年,成都电子科技大学沈斌^[36]和董玲^[37]分别基于太赫兹(THz)和常规频段 SAR 用频谱或时频分析方法检测微动目标,用小波、独立成分分析方法估计其参数.

2009年,国防科技大学吴晓芳等研究了目标转动、振动对 SAR 图像影响,指出具有直线型、直线点列型、直线条带型和直线圆列型等特征,刘阳等人还研究了基于微动的 SAR 无源干扰技术^[12,38].

2011年,空军工程大学张伟等人研究了基于 DPCA 和 ATI 的地面振动目标微多普勒提取方法^[39].同时也研究了双站 SAR 模式下地面旋转部件的微多普勒效应,指出其与收发载机的几何参数有关^[40,41].

上述研究可总结为微动影响分析、微动目标检测、微多普勒分析与参数估计三个方面.在影响分析方面,

主要结论是微动带来高频相位形成成对回波并在 SAR 图像中造成鬼影、栅栏、模糊球等特征.在检测方面,目前提出的方法包括基于单通道回波或图像的广义似然比检验和循环谱密度法,以及多通道 DPCA、ATI 等方法.在微多普勒分析与参数估计方面,主要采用时频分析方法.

在雷达系统方面主要采用单站单通道 SAR、单站多通道 SAR 和双站 SAR,波段包括 X 波段、毫米波段甚至太赫兹波段,模式主要为聚束和条带.

4.3 综合分析

综上所述,国外已有对 SAR/MMTI 的初步研究,研究问题主要集中于微动目标的分离、时频分析和参数估计;同时开展了部分试验,尚未实用,表明微动在 SAR 中可观测到,但对于微小振动,即使利用毫米波也难以探测,据分析主要由于微多普勒效应仍不够显著.国内研究刚刚起步,但已将目标微动用于 SAR 干扰.总体来看,国内外研究还存在如下问题或不足:

- (1) 目标运动模型较为简单,未考虑多振动分量;
- (2) 目标散射模型较为简单,只是采用理想点模型,但实际上积累时间内目标转动可能超过一定角度,由于散射系数随姿态变化,此时点模型已不适用;
- (3) 目标微动分析方法单一,主要采用时频分布;
- (4) 仿真或实验多在噪声和杂波较小的环境下进行;
- (5) 未考虑微动造成的附加的距离单元徙动;
- (6) 未考虑同一距离单元内存在多个运动参数不同的微动目标情况;
- (7) 研究工作尚停留在微动目标参数估计上而没有对微动目标重新聚焦成像.成像后目标聚焦,既能提高检测概率,还可获得目标更直观和精细的信息,弥补仅利用微动参数进行目标识别的不足.

上述问题将是今后研究的重点.

5 应用前景

SAR/MMTI 雷达可装备在汽车、飞机、无人机、卫星和导弹上,具有广阔的应用前景.具体包括:

(1) 侦察监视

基于对雷达回波或图像的处理,SAR/MMTI 可以支撑海量 SAR 图像的快速解译,用于对地面、海面和低空战场微动目标进行实时的高分辨观测和侦察监视.

(2) 干扰对抗

利用目标微动对 SAR 成像和 SAR/GMTI 产生不利的影可以实施 SAR 干扰.这时,SAR/MMTI 可作为对抗此类干扰的手段.

(3) 精确制导

若雷达导引头具备 SAR/MMTI 功能,则有助于实现

对坦克、雷达站等高价值军事目标和舰载雷达天线等重要目标部位的精细识别与精确打击。

(4) 人体探测

SAR/MMTI 技术还可基于摆臂等微动特征用于人体探测,对于行车安全、维稳反恐、边境巡查等具有重要的意义。

6 SAR/MMTI 发展趋势

(1) 在理论上朝信处数学方向发展:微动、微多普勒、微动参数估计等在更高层次都可类化为信号处理和数学的基本理论或问题,如李群、李代数、Mobius 群、逆问题等,该趋势符合“物理问题数学化、数学结论物理化”基本规律。

(2) 在应用上朝实时稳健方向发展:追求快速、稳健地实现 SAR 微动目标的实时探测。

(3) 在深度上朝精细一体方向发展:强调对目标和部件微动分量的精细化探测;通过引入参数化散射中心模型和压缩传感、贝叶斯估计等重建技术实现检测、估计、成像、识别的一体化。

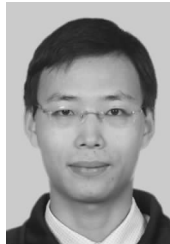
(4) 在广度上朝交叉结合方向发展:与新兴频段、平台形式、成像模式、雷达体制等交叉结合,从而衍生出诸多全新的研究方向,例如太赫兹 SAR/MMTI、曲线 SAR/MMTI、滑动聚束 SAR/MMTI、多发多收 SAR/MMTI 等。

参考文献

- [1] Deng B, Wu G Z, Qin Y L, et al. SAR/MMTI: an extension to conventional SAR/GMTI and a combination of SAR and micro-motion techniques [A]. IET RADAR Conference [C]. Guilin, China; IET, 2009. 42 - 45.
- [2] Wang Q, Pepin M, Beach R J, et al. Demonstration of target vibration estimation in synthetic aperture radar imagery [A]. IGARSS [C]. Vancouver, BC, Canada; IEEE, 2011. 4083 - 4086.
- [3] Miceli W J, Gross L A. Test results from the AN/APY-6 SAR/GMTI surveillance, tracking and targeting radar [A]. IEEE Radar Conference [C]. Atlanta, GA; IEEE, 2001. 13 - 17.
- [4] Thayaparan T, Suresh K, Qian S, et al. Micro-Doppler analysis of a rotating target in synthetic aperture radar [J]. IET Signal Processing, 2010, 4(3): 245 - 255.
- [5] Sparr T, Krane B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR [J]. IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation, 2003, 150(4): 277 - 283.
- [6] Rüegg M, Meier E, Nüesch D. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2): 293 - 304.
- [7] Sparr T. Moving target motion estimation and focusing in SAR images [A]. IEEE Radar Conference [C]. Arlington VA; IEEE, 2005. 290 - 294.
- [8] Remund B. High-range-resolution (HRR) GMTI [J]. Sandia Remote Sensing E-magazine, 2005, 2(1): 1 - 2.
- [9] Zhang Y, Amin M, Ahmad F. Localization of inanimate moving targets using dual-frequency synthetic aperture radar and time-frequency analysis [A]. IGARSS [C]. Boston, MA; IEEE, 2008. 33 - 36.
- [10] Baumgartner S, Krieger G, Bethke K, et al. Traffic monitoring with SAR: implications of target acceleration [A]. EUSAR [C]. Dresden, Germany; Elsevier, 2006. 34 - 37.
- [11] 孙光才,白雪茹,周峰,等.一种新的无源压制性 SAR 干扰方法 [J]. 电子与信息学报. 2009, 31(3): 610 - 613. Sun Guang-cai, Bai Xue-ru, Zhou Feng, et al. A new passive barrage jamming method for SAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(3): 610 - 613. (in Chinese)
- [12] 吴晓芳. SAR-GMTI 运动调制干扰技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2009. Wu Xiao-fang. Study on Motion Modulation Jamming Techniques Against SAR-GMTI [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] Sharma J J. The Influence of Target Acceleration on Dual-Channel SAR-GMTI Data [D]. Calgary, Canada; The University of Calgary, 2004.
- [14] Werness S A, Stuff M A, Fienup J R. Two-dimensional imaging of moving targets in SAR data [A]. ACSSC [C]. Pacific Grove, CA, USA; MAPLE, 1990. 16 - 22.
- [15] 邓彬. 机载 SAR 地面运动目标检测方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006. Deng Bin. Research on Ground Moving Targets Detection with Airborne SAR [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [16] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. USA: Artch house, 1995. 386 - 395.
- [17] Subotic N S, Thelen B J, Carrara D A. Cyclostationary signal models for the detection and characterization of vibrating objects in SAR data [A]. ACSSC [C]. USA; IEEE, 1998. 1304 - 1308.
- [18] Sparr T, Krane B. Analysis of phase modulation caused by target motion in SAR images [A]. SPIE [C]. USA; SPIE, 2003. 578 - 588.
- [19] Sparr T. A moving target in a SAR image analysed with time-frequency methods [A]. EUSAR [C]. Berlin; Elsevier, 2004. 833 - 836.
- [20] Silverstein S D, Hawkins C E. Synthetic aperture radar image signatures of rotating objects [A]. ACSSC [C]. USA; IEEE, 2004. 1663 - 1667.
- [21] Thayaparan T, Abrol S, Qian S. Micro-Doppler analysis of rotating target in SAR [R]. Ottawa, Canada; DRDC, 2005.
- [22] Sharma J J, Gierull C H, Collins M J. The influence of target

- acceleration on velocity estimation in dual-channel SAR-GMTI [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(1): 134 – 147.
- [23] Barber B C. Imaging the rotor blades of hovering helicopters with SAR [A]. IEEE Radar Conference [C]. USA: IEEE, 2008. 652 – 657.
- [24] Rigling B D. Image-quality focusing of rotating SAR targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 750 – 754.
- [25] Fasih A R, Rigling B D, Moses R L. Analysis of target rotation and translation in SAR imagery [A]. SPIE [C]. USA: SPIE, 2009. 1 – 12.
- [26] Wang Q, Santhanam B, Pepin M, et al. SAR vibrometry using the pseudo-subspace approach based on the discrete fractional Fourier transform [A]. SPIE [C]. USA: SPIE, 2011. 1 – 8.
- [27] André D B, Blacknell D, Muff D G, et al. The physics of vibrating scatterers in SAR imagery [A]. SPIE [C]. USA: SPIE, 2011. 1 – 13.
- [28] Clemente C, Soraghan J J. Vibrating target micro-Doppler signature in bistatic SAR with a fixed receiver [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 8(50): 3219 – 3227.
- [29] Deng B, Qin Y L, Wang H Q, et al. An efficient mathematical description of range models for high-order-motion targets in synthetic aperture radar [A]. RadarCon [C]. USA: IEEE, 2012. 6 – 10.
- [30] Li X, Deng B, Qin Y L, et al. The influence of target micro-motion on SAR and GMTI [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7): 2738 – 2751.
- [31] Deng B, Wang H Q, Li X, et al. Generalised likelihood ratio test detector for micro-motion targets in SAR raw signals [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011, 5(5): 528 – 535.
- [32] Deng B, Wang H Q, Wu C G, et al. SAR micromotion target detection based on gapped sine curves [A]. IGARSS [C]. Munich, Germany: IEEE, 2012. 29 – 32.
- [33] Chen Y B, Deng B, Wang H Q, et al. Vibration target detection and vibration parameters estimation based on the DPCA technique in dual-channel SAR [J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(10): 2281 – 2291.
- [34] 邓彬. 合成孔径雷达微动目标指示 (SAR/MMTI) 研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
Deng Bin. Research on Synthetic Aperture Radar Micro-Motion Target Indication [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [35] Zhu S, Mohammad-Djafari A, Wang H Q, et al. Parameter estimation for micromotion SAR target based on sparse signal representation [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, 2012(13): 1 – 9.
- [36] 沈斌. Thz 频段 SAR 成像及微多普勒目标检测与分离技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
Shen Bin. Study on THz-SAR Imaging and Micro-Doppler Target Detection and Separation [D]. Chengdu: UEST, 2008. (in Chinese)
- [37] 董玲. 合成孔径雷达微多普勒特征研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
Dong Ling. Study on Synthetic Aperture Radar Micro-Doppler [D]. Chengdu: UEST, 2009. (in Chinese)
- [38] 刘阳, 王雪松. 微动特性干扰对基于 FrFT 的多孔径 SAR/GMTI 的效果分析 [J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2039 – 2045.
Liu Yang, Wang Xue-song. The analysis of the effect for a micro-motion jamming to multi-aperture SAR/GMTI based on fractional Fourier transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2039 – 2045. (in Chinese)
- [39] 张伟, 童创明, 张群, 等. 基于 DPCA 杂波抑制的地面振动目标微多普勒提取 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(04): 738 – 741.
Zhang Wei, Tong Chuang-ming, Zhang Qun, et al. Micro-Doppler extraction of ground vibrating targets based on SAR/DPCA technique [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(04): 738 – 741. (in Chinese)
- [40] 张伟, 童创明, 张群. 双站 SAR 雷达目标旋转部件的微多普勒效应 [J]. 现代雷达, 2011, 33(03): 51 – 54.
Zhang Wei, Tong Chuang-ming, Zhang Qun. Micro-Doppler effect of target with rotating part in bistatic SAR [J]. Modern Radar, 2011, 33(03): 51 – 54. (in Chinese)
- [41] Zhang W, Tong C, Zhang Q, et al. Extraction of vibrating features with dual-channel fixed-receiver bistatic SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(3): 507 – 511.

作者简介



邓彬 男, 1981 年出生于山东邹城. 2006 年和 2011 年在国防科学技术大学电子科学与工程学院分别获得工学硕士和工学博士学位. 现为国防科技大学讲师, 主要研究方向为 SAR、SAR/GMTI、太赫兹雷达.

E-mail: dengbin@nudt.edu.cn



秦玉亮 男, 1980 年出生于山东潍坊. 2004 年和 2008 年在国防科学技术大学电子科学与工程学院分别获得工学硕士和工学博士学位. 现为国防科技大学副研究员, 主要研究方向为雷达成像、自动目标识别.

E-mail: qinyuliang@nudt.edu.cn