

文章编号:1004-9037(2014)04-0508-08

复杂运动目标 ISAR 成像技术进展与展望

黎 湘 高勋章 刘永祥

(国防科学技术大学电子科学与工程学院,长沙,410073)

摘要:逆合成孔径雷达成像是宽带雷达实现目标信息获取和精细描述的重要途径,但在成像过程中存在复杂运动导致散焦和成像分辨率不高两个难题。针对目标复杂运动导致成像散焦问题,本文总结了微动对雷达波调制、进动目标成像、三维运动成像、分离部件成像等技术现状;针对成像分辨率不高问题,分析了多频段宽带回波相参配准、融合成像等技术进展。本文介绍了雷达成像新技术,为解决上述两个难题带来新的思路和途径,其中,雷达关联成像不依赖于雷达与目标的相对运动,可避免成像的复杂运动补偿;太赫兹雷达成像容易实现大带宽和窄波束,获得目标精细雷达成像。最后对新兴技术的难点和发展趋势进行了展望。

关键词:逆合成孔径雷达;微动;分辨率增强;雷达关联成像;太赫兹雷达成像

中图分类号:TN959.3

文献标志码:A

Research Advances in ISAR Imagery of Complex Motion Target

Li Xiang, Gao Xunzhang, Liu Yongxiang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: Inverse synthetic aperture radar (ISAR) is an important approach to derive detailed information of wideband radar target, where defocusing caused by complex motion and low resolution are two key difficulties. This paper gives a survey of radar imaging of complex motion target, including modulation effect of micro-motion, procession target imaging, three-dimensional motion target imaging and separate motion parts imaging. Aiming at improving image resolution, coherent compensation among sub-bands and fusion imaging are also demonstrated. Then new approaches of radar imaging are presented, wherein radar coincidence imaging is irrelevant to the relative motion between radar and target, thus avoid compensating complex motions. In THz imaging it is easy to implement large bandwidth and narrow wave beam; thereby the formulated high resolution images are with more details which are beneficial to target recognition. Finally, difficulties and directions for these two newly developing techniques are pointed out.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); micro-motion; resolution enhancement; radar coincidence imaging; THz radar imaging

引 言

高分辨成像雷达作为一种全天候、全天时、远距离的信息获取手段,在空间探测、导弹防御、防空、航空管制等方面有广泛应用。逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像是高分辨雷达的主要成像方式,旨在解决导弹、卫星、

飞机、舰船、车辆等运动目标的成像问题,从20世纪60年代以来,一直是雷达领域的重点方向和研究热点。ISAR像反映了目标散射率的分布特性,可以刻画目标的尺寸、结构、形状等特征,为目标特性描述和识别提供丰富的信息。ISAR成像原理已经比较成熟,但在实际应用中仍主要存在两大难题:一是目标复杂运动导致的成像散焦;二是图像的分辨率不足以获取目标的细节信息。本文围绕

复杂目标高分辨 ISAR 清晰成像,从微动处理和分辨率增强两个方面回顾了技术进展,并阐述了新兴的雷达关联成像技术和太赫兹雷达成像技术在该领域的潜在技术优势,并对难点和发展趋势进行了总结和展望。

1 复杂运动目标成像技术

在雷达探测领域中,微动(Micro-motion)是使雷达回波产生时变多普勒效应的多种复杂运动形式的统称。微动在目标探测领域广泛存在,如人行走,桥梁振动,雷达天线转动,舰船摆动,直升机旋翼转动,飞机颤动,中段弹头进动等^[1-4]。微动对雷达回波的调制效应体现在雷达散射截面(Radar cross section)、多普勒谱、高分辨像等雷达特征信号上,蕴含了目标的几何结构及运动特性。

1.1 微动对宽带雷达信号的调制作用

旋转、振动、翻滚和进动是常见的 4 种类型微动形式。在雷达视线方向上,其基本运动形式均可认为是简谐运动,其微多普勒可表示为

$$f_{\text{mD}}(t) = \frac{2\omega_0 A_0}{\lambda} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: λ 为雷达信号波长, ω_0 为微动频率, A_0 为微动幅度。可以看出,微多普勒本质上是由目标微动在雷达视线上的速度分量引起,这 4 类典型微动引起的微多普勒具有正弦调制的时变特性,且微多普勒幅度与微动幅度、微动频率、雷达视线角等因素有关。微多普勒调制描述了微动引起的瞬时多普勒变化特性,反映了目标的瞬时速度变化特性。

微动目标散射特性的时变对雷达回波也会产生非线性幅度调制。对于进动锥体目标,在进动角较小(小于 15°)情况下,目标底部边缘等效散射中心强度变化规律为^[5]

$$\sigma(t) = \sigma_0 \{ \rho + \exp[B \sin(\omega_0 t + \eta)] \} \quad (2)$$

式中 σ_0, ρ, B, η 为模型参数,这些参数与散射中心特性相关。此时进动目标的雷达回波可表示为

$$s(t) = \sum_{l=1}^L \sigma_{0l} \{ \rho_l + \exp[B_l \sin(\omega_0 t + \eta_l)] \} \cdot \exp\{j \frac{4\pi f_0}{c} [r_{0l} + A_{0l} \sin(\omega_0 t + \varphi_l)]\} \quad (3)$$

式中 L 为目标等效散射中心个数。雷达目标的多散射中心决定了多分量,散射强度随姿态角的变化决定了调幅特性,散射中心的径向速度决定了调频特性。雷达回波的调制特性如图 1 所示,即使进动周期、进动角、平均视界角、雷达测量频段等因素发

生变化,雷达回波中的多分量非线性调频、调幅特性始终保持。

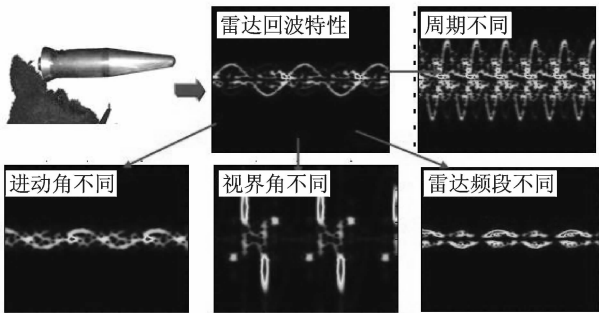


图 1 进动锥体目标的雷达波调制规律及不同因素影响
Fig. 1 Micro-Doppler time-frequency distribution of cone with different precession parameters

1.2 微动目标 ISAR 成像

微动目标 ISAR 成像的特点是在相干处理时间内存在复杂的姿态变化,如弹头的进动、舰船俯仰、横滚和偏航方向上的转动、飞机的机动以及直升机叶片的旋转等。这些复杂的姿态运动引起目标多普勒频率的非线性时变和成像平面的变化,导致传统方法无法实现清晰成像。目前微动成像方法包括两种思路:一种是利用微动成像引起的姿态变化进行成像,如进动目标成像,舰船摆动成像等。另一种思路是将微动引起的雷达回波分量和目标主体回波分离,消除微动影响后,分别对目标主体和微动部件成像,如运动直升机成像等。

(1)进动目标成像。进动参数估计和进动目标成像是国内外雷达技术研究者高度关注的方向之一^[6-7]。尽管进动对雷达回波的调制机理已经比较清楚,但是由于微动调制在电磁波中的多普勒分量往往较弱,因而利用雷达回波实现进动参数的准确估计和清晰成像仍然比较困难。对于进动旋转对称体目标,如果不考虑自旋影响,可以等效认为目标散射中心在成像平面内做非均匀转动,因而散射点的多普勒历程具有时变性;另外在一个进动周期内目标相对雷达的视线角变化不大,受脉冲重复频率的限制,能获得的雷达回波数有限,因此采用传统的成像方法难以重构目标像。文献[8]依据雷达视线角的非线性变化规律构造稀疏词典,采用稀疏恢复方法研究了进动目标成像。该方法利用短时间内的少量回波数据可以实现进动目标的高分辨率成像。图 2 所示为采用暗室测量数据合成进动锥体目标回波的成像结果。

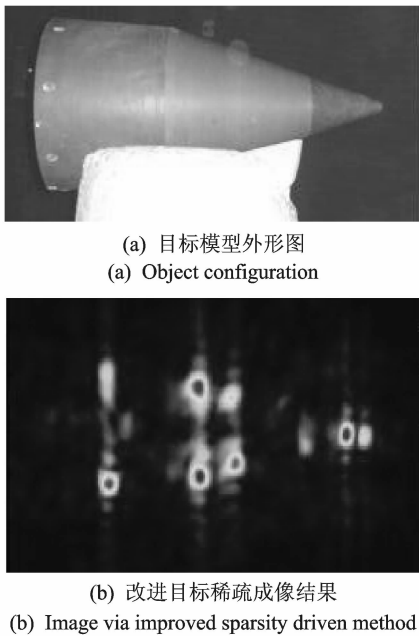


图 2 进动锥体目标 ISAR 成像结果

Fig. 2 ISAR image of precession target via sparsity-driven method

(2)三维摆动目标成像。舰船 ISAR 成像是典型的微动成像问题。舰船在航行过程中受风浪影响存在偏摆、侧摆和俯仰 3 个维度的姿态运动。从雷达成像的角度来看,相当于目标在空间存在复杂的三维转动,ISAR 成像平面具有时变性。同时,由于舰船航行和摆动速度较慢,成像过程需要的相参积累时间较长,进一步增大了运动补偿的难度。文献[9]将散射点回波等效为调幅-线调频信号,采用 Randon-Wigner 算法估计模型参数后进行高阶相位补偿的方法,得到了实测数据的舰船目标 ISAR 图像。比萨大学的 Martorella 等人采用距离-瞬时多普勒成像方法也得到了清晰的舰船目标 ISAR 像^[10],如图 3 所示。

(3)含微动部件的目标成像。对于包含微动部件的目标成像,文献研究较多^[11-13],其关键在于目

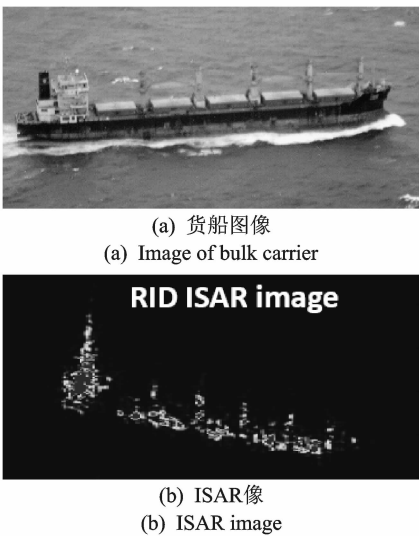


图 3 采用距离瞬时多普勒方法对三维摆动货船的成像结果^[10]

Fig. 3 ISAR image of bulk carrier with three-dimensional rolling motion via RID technique

标主体与微动部件信号的分离,分离之后的目标主体回波采用传统方法进行成像。美国得克萨斯州大学奥斯汀分校 Li Junfei 采用自适应 chirplet 基分解方法对喷气飞机的主体回波和引擎旋转叶片回波进行分离并分别成像^[14],结果如图 4 所示。

2 分辨率增强技术

分辨率是 ISAR 图像的重要性能指标,根据 ISAR 成像原理,ISAR 像的距离分辨率取决于发射信号的带宽,受器件工艺水平的限制,单部雷达带宽不可能太大,同时带宽过大会导致雷达采样率过高、数据量大及传输处理等困难;ISAR 像的方位分辨率取决于在成像积累时间内目标相对于雷达视线的转角,在目标运动形式比较复杂的情况下,长时间观测会导致运动补偿困难,而相参处理时间过短又难以获得充足的观测数据,无法满足高分辨成像的需求。因此,通过增加带宽和转角来改善成像分辨率的效

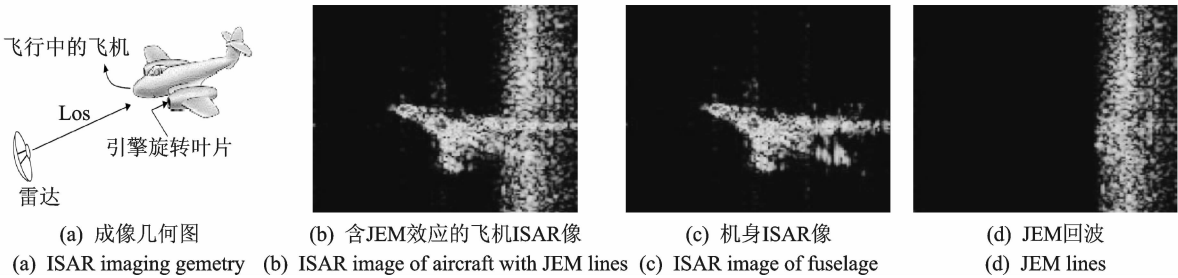


图 4 对飞机回波进行分离后的成像结果^[14]

Fig. 4 ISAR image of aircraft with JEM lines based on adaptive chirplet basis decomposition

果有限,难以满足实际应用需求。

分辨率增强是指利用单组或者多组从不同视角、不同频段获得的雷达回波数据,通过数据处理的手段来提高雷达图像的分辨率。ISAR 分辨率增强技术的发展历程可以分为两个阶段^[15],第一个阶段是利用单部雷达信号进行目标特性增强处理,即超分辨成像处理。典型方法有两类:(1)带宽外推技术。将雷达接收数据用 AR 过程建模,并利用 AR 过程外推观测窗之外的数据,然后运用傅立叶变换来重构目标图像^[16-17],利用这种方法可以将高分辨雷达像的距离分辨率提高 2~3 倍。(2)现代谱估计技术。通过对雷达回波信号进行参数化建模,采用现代谱估计技术如 MUSIC^[18],矩阵束方法^[19],旋转不变技术(ESPRIT)^[20]估计出模型参数从而得到散射中心的二维分布(即雷达像)。分辨率增强技术研究的第二个阶段是采用多部不同频段雷达回波合成的方法提高分辨率。林肯实验室最早开展这方面的研究,1997 年 Cuomo 等人发表了一种通过多频带融合提高雷达分辨力的新思路^[21],该方法包括子频带散射模型参数估计,回波相参配准和融合成像 3 个关键环节,其中子带回波相参配准是实现融合成像的前提和关键。文献[22,23]进一步针对多频带融合和多视角融合两种情形开展了深入的研究,将状态空间法成功应用于宽带回波模型的参数求解,利用弹头模型的暗室测量数据获得了清晰的融合 ISAR 像,但该方法在回波相参失配、信噪比不高的条件下效果并不理想。国内对雷达融合成像的研究相对较晚,主要工作集中在子带数据相参处理和模型的参数求解方面^[24-29],总体思路并未突破 Cuomo 等人提出的框架。

2.1 多频段回波相参配准

由于不同的宽带雷达硬件时延和相移不同,参与融合的多频段回波数据之间是非相参的。即便采用高精度的同步技术,信号之间的相参性也无法满足融合成像要求,因此对不同频段雷达的回波数据进行高精度相参配准极为关键。研究表明^[21],不同频段雷达回波之间的失配相位可表示为一个固定相位和一个线性相位之和。当前的相参配准方法分为两类,一类是基于模型的方法,其主要思想是建立多个波段的 Prony 模型,用超分辨的方法估计出每个波段模型的参数,然后以其中一个波段数据为基准,利用迭代优化估计出线性相位和固定相位,然后进行校正^[21,27-29]。另一类方法是基于相

关的算法,通过推导线性相位与一维像相关函数的关系求得线性相位,然后通过全局搜索相干函数极小值得到固定相位^[24-25,30]。前一类方法计算量较大,且对噪声敏感。后一类方法计算量较小,但是在低信噪比下的参数估计精度还有待提高。图 5 所示为采用一维像最小熵优化方法相参配准前后回波数据(实部)。

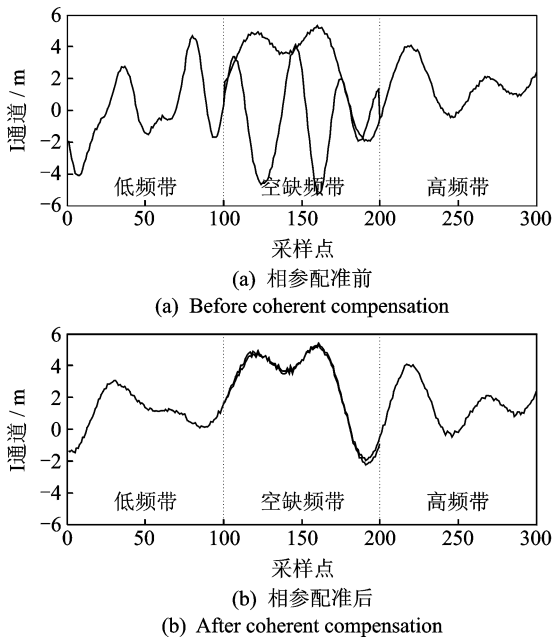


图 5 最小熵优化相参配准前后回波数据(实部)
Fig. 5 Echo data before and after coherent compensation (real part)

2.2 多频段融合成像

多频段宽带雷达成像的回波数据在频域上处于不连续的多个子频带,因此其成像过程与单部宽带雷达的成像有较大的区别。其主要思路是利用相参配准的多频段数据求解出全频段极点模型,再通过模型外推出空缺频段回波数据,最后利用估计出的全频段数据进行融合成像。图 6 是采用暗室测量数据进行融合成像的结果。目标外形如图 2(a)所示。图 6(a,b)分别为低频子带(8~9.2 GHz)和高频子带(10.8~12 GHz) ISAR 像,图 6(c,d)分别为融合 ISAR 像和全频段真实数据 ISAR 像。

和波段融合类似,横向分辨率增强的关键是不 同视角域数据的相参配准。由于雷达视线变化,不同视角域的目标散射特性不同,因而通过多视角域融合来增大横向分辨力难度较大,这方面的研究也较少。目前的研究大多集中在多雷达邻近配置条

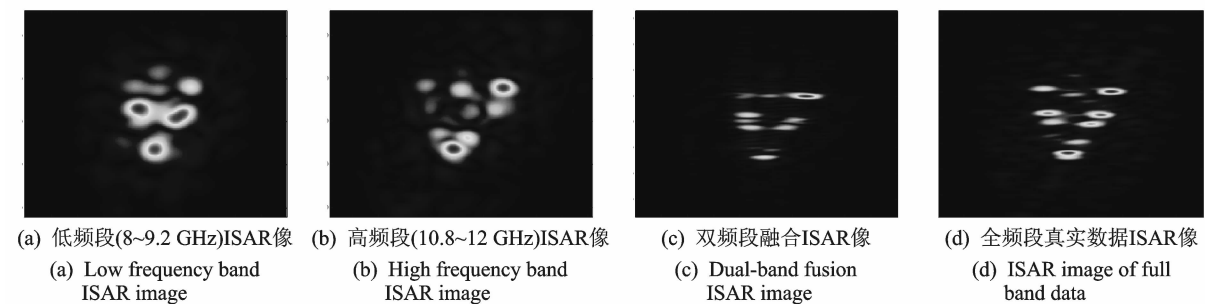


图 6 双频段融合 ISAR 成像结果
Fig. 6 Dual-band fusion ISAR image

件下的多频带融合成像。近年来稀疏表示理论在雷达成像领域的应用研究发展较快,相比传统的超分辨率方法,稀疏表示技术不需要估计模型阶数,在抗噪性和参数估计精度方面具有很大优势^[31],利用稀疏表示理论实现宽带雷达信号的分辨率增强是一个值得关注的方向。

3 雷达成像新技术

3.1 雷达关联成像

雷达关联成像是借鉴量子物理中量子纠缠成像与赝热光关联成像原理,将光学波段量子成像拓展至微波波段而形成的一种新的微波雷达成像方式。非纠缠微波源关联成像不依赖于量子效应,可在现有硬件水平上实现。雷达关联成像采用随机辐射源照射目标,在目标表面无法形成稳定的电磁激励,目标散射特性可能与传统的相干信号照射下的目标散射特性有所不同,有利于避免强散射点的形成,抑制闪烁现象,成像结果能更好地反映目标结构信息,提高目标检测、跟踪和识别的效率。雷达关联成像的高分辨率不是基于距离-多普勒原理,不依赖于雷达与目标的相对运动,因此可避免 SAR/ISAR 成像的复杂运动补偿难题,从而从根

本上解决传统成像技术的瓶颈难题,弥补传统成像技术在“前视/凝视”等非理想观测几何条件下和对非合作运动目标成像方面的不足,带来巨大的军事应用潜力^[32-33]。图 7 所示为雷达关联成像的实验原理图。

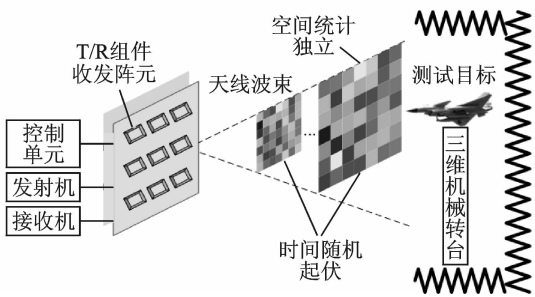


图 7 雷达关联成像实验原理图
Fig. 7 Diagram of radar coincidence imaging

从理论上讲,雷达关联成像可以在很短时间(利用较少的脉冲个数)即可实现目标图像的高分辨率重构,达到类似于光学照相机的“快拍”成像效果,大大提升成像探测的效率。同时,也可避免传统 SAR 成像面临的大视场与高分辨之间的矛盾,解决大覆盖区域多普勒模糊问题。图 8 所示为雷达关联成像“快拍”仿真成像结果^[33]。

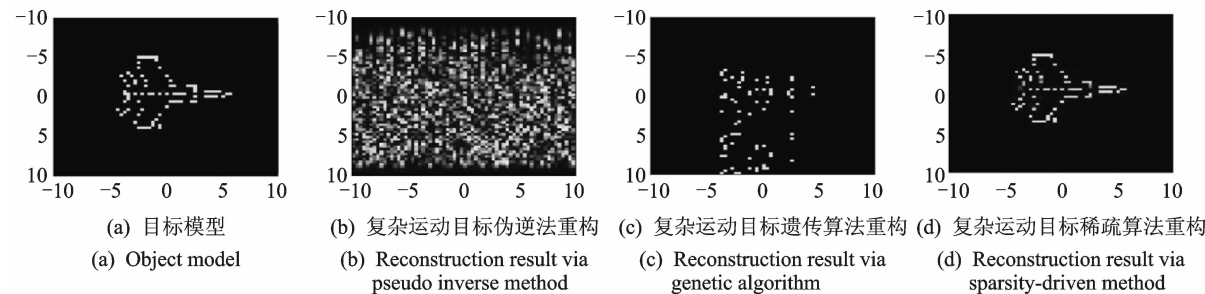


图 8 复杂目标凝视成像结果
Fig. 8 Radar coincidence imaging results of complex target

3.2 太赫兹雷达成像技术

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率在 100 GHz~10 THz 范围的电磁波,它介于毫米波与红外之间,称为亚毫米波或者远红外光,处于从电子学向光子学的过渡区。相对于微波、毫米波,太赫兹波的波长较短,更易于实现极大信号带宽和极窄天线波束,从而获得精细的目标成像。相对微波雷达,太赫兹雷达具有更高的空间分辨力和时间分辨力,可以探测更小的目标并实现更精确的角跟踪和定位^[34-35],因而太赫兹雷达成为从体制上提高雷达分辨率的重要发展方向。近几年,美国喷气推进实验室、德国应用科学研究所高频物理与雷达研究中心陆续建立了太赫兹实验成像系统。2008

年,德国高频物理与雷达技术研究所 94 GHz 毫米波雷达 COBRA 的基础上研制了基于固态电子学器件的 220 GHz FMCW 特征测量实验雷达^[36]。该雷达系统的关键组成部件包括低噪放大器、110 GHz 二倍频器与功率放大器等。测试试验对自行车与卡车等目标进行散射中心分布测量,获得了分辨率为 1.8 cm 的二维像,如图 9 所示。

美国马萨诸塞大学亚毫米波技术实验室在 2010 年基于太赫兹量子级联激光器实现了一部 2.408 THz 相干雷达成像系统^[37],实现了对旋转目标的相干成像,图像分辨率达到了 0.4 mm×0.6 mm。图 10 为该雷达系统对 1/72 的缩比 T80BV 坦克模型的 ISAR 成像结果。

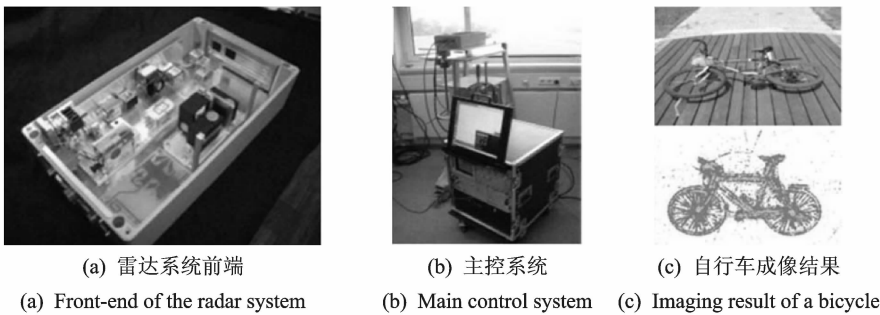


图 9 220 GHz 雷达系统及对自行车的高分辨成像结果
Fig. 9 220 GHz radar system and its high resolution imaging result of a bicycle



图 10 2.4 THz 雷达对坦克缩比模型的成像结果
Fig. 10 Imaging result of scale model tank with 2.4 THz radar

4 结束语

随着宽带雷达成像技术发展,复杂运动目标成像高分辨清晰成像问题在实际中凸显出来,尽管国内外已经取得了一些有意义的成果,但与实际需求尚有较大差距,依然存在诸多科学技术和工程问题尚未解决,例如复杂运动补偿和分辨率增强方面都未形成成熟途径和方法。

除了雷达成像的信号处理方法之外,新体制雷达技术也是最富潜力的发展方向。雷达关联成像技术可以在很短时间内实现目标“快拍”成像,因而有望从根本上解决 ISAR 成像中的复杂运动难题。但是雷达关联成像与传统成像方法基本原理不同,在散射特性、成像算法与应用研究等方面也面临着一些困难:(1)初步研究虽表明雷达关联成像的可行性,但雷达关联成像理论体系远未形成,许多科学问题尚不明晰,如空时随机辐射条件下的目标散射特性、凝视高分辨成像机理、目标图像重构条件、分辨力限定量表征等基础理论问题都需要系统深入研究;(2)相比于传统成像的相关运算和脉冲压缩方法,雷达关联成像重构计算量大大增加,尤其是在目标复杂,需要重构的参数较多的情形下;(3)雷达关联成像的探测距离受到限制,只能适用于近距离成像应用。如何深入挖掘并利用波束内可分辨信息、增大成像探测距离是雷达关联成像应用需解决的重要问题。

太赫兹技术已经被国际科学界公认为是一个

具有战略意义的领域。目前太赫兹雷达存在的主要问题是源功率低、探测器灵敏度有限和水分吸收严重。但在对流层之外,太赫兹在很宽的频带内不存在大气衰减,因而空基太赫兹雷达可以实现对空间目标的远距主动探测、精确测距测速测角、高分辨率成像、精细结构特征反演等,并且可以利用材料在太赫兹频段丰富的特征谱线提取目标的“指纹特征”,弥补现有微波和红外探测系统的不足,成为空间态势感知系统的有力补充。随着辐射功率大、重量轻、体积小、实用型的太赫兹信号源技术的进步,太赫兹雷达有望在未来成为高精度高分辨雷达的发展方向。

参考文献:

- [1] Chen V C, Li F, Ho S, et al. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] Chen V C, Li F, Ho S, et al. Analysis of micro-Doppler signatures [J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4):271-276.
- [3] Chen V C, Ling H. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis [M]. Boston: Artech House Press, 2002:173-192.
- [4] 庄钊文,刘永祥,黎湘. 目标微动特性研究进展 [J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520-525.
Zhuang Zhaowen, Liu Yongxiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520-525.
- [5] 刘永祥,李康乐,黎湘,等. 雷达目标微动特性研究 [J]. 科技导报, 2011, 29(22):72-79.
Liu Yongxiang, Li Kangle, Li Xiang, et al. Characteristic analysis of radar target with micro-motion [J]. Sci Technol Rev, 2011, 29(22): 72-79.
- [6] Yao H Y, Sun W F, Ma X Y, et al. Precession feature extraction of warhead with empennages [J]. Electronics Letters, 2013,49(9): 617-618.
- [7] Wang T, Wang X S, Chang Y L, et al. Estimation of precession parameters and generation of ISAR images of ballistic missile targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2010, 46(4): 1983-1995.
- [8] 刘记红. 基于压缩感知的 ISAR 成像技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.
Liu Jihong. Inverse sythetic aperture radar imaging technique based on compressed sensing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [9] 雷杰,邢梦道,保铮. 一种基于钟摆模型的舰船目标成像方法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(1): 1-6.
Lei Jie, Xing Mengdao, Bao Zheng. A method of ISAR ship imaging based on pendulum module [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 28(1): 1-6.
- [10] Berizzi F, Mese E D, Diani M, et al. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous Doppler technique: Modeling and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(12):1880-1890.
- [11] Bai X, Xing M, Zhou F, et al. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [12] Qian S E, Chen D. ISAR feature extraction from targets with non-rigid body motion[C]//Proceedings on Radar Sensor Technology. Orlando: SPIE, 2001 (4374):1-9.
- [13] Hagelen M, Wahlen A, Brehm T. ISAR imaging of flying helicopters at millimeter-wave frequencies[C]//Proceedings of The First European Radar Conference. Amsterdam: EURAD, 2004:265-268.
- [14] Li J. Model-based signal processing for radar imaging of targets with complex motions [D]. Texas: University of Texas at Austin, 2002:75-98.
- [15] 叶钊. 基于信号稀疏表示的 ISAR 目标特性增强技术[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
Ye Fang. ISAR target feature enhancement based on compressed sensing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [16] Borison S L, Bowling S B, Cuomo K M. Super-resolution method for wideband radar [J]. Lincoln Lab Journal, 1992, 5: 441-461.
- [17] Gabriel W F. Improved range superresolution via bandwidth extrapolation [C]//Proceedings of the National Radar Conference. Lynnfield, MA: [s. n.], 1993:123-127.
- [18] Odendaal J W, Barnard E, Pistorius C W I. Two-dimensional super-resolution radar imaging using the MUSIC algorithm [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 4(10): 1386-1391.
- [19] Hua Y. High resolution imaging of continuously moving frequency radar [J]. Signal Processing, 1994, 35(1): 33-40.
- [20] Barbarossa S, Marsili L, Mungari G. SAR super-resolution imaging by signal subspace projection techniques[C]//Proceedings of EUSAR'96. Konigswinter, Germany: [s. n.], 1996: 267-270.
- [21] Cuomo K M, Pion J E, Mayhan J T. Ultrawide-band coherent processing [J]. The Lincoln Laboratory

- Journal, 1997, 10(2):203-222.
- [22] Piou J E, Cuomo K M, Mayhan J T. A state-space technique for ultrawide-bandwidth coherent processing[R]. Technical Report 1054, Lexington Massachusetts, USA; Lincoln Lab, 1999.
- [23] Vann L D, Cuomo K M, Piou J E, et al. Multisensor fusion processing for enhanced radar imaging [R]. Lexington Massachusetts, USA; Lincoln Lab, 2000.
- [24] 付耀文. 雷达目标融合识别研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2003.
Fu Yaowen. Research on radar target fusion recognition [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [25] 刘承兰,贺峰,魏玺章,等. 基于数据相关的多雷达融合成像相干配准研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6):1266-1271.
Liu Chenglan, He Feng, Wei Xizhang, et al. Research on multiple radar fusion imaging coherence compensation based on data correlation[J]. System Engineering and Electronics, 2010, 32(6):1266-1271.
- [26] 王成. 雷达信号层融合成像技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
Wang Cheng. Research on radar signal level fusion imaging techniques [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [27] 王琦. 空间目标 ISAR 成像的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.
Wang Qi. Study of ISAR imaging for space targets [D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [28] He F, Xu X. High-resolution imaging based on coherent processing for distributed multi-band radar data [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2013, 141:383-401.
- [29] Xu X, Li J. Ultrawide-band radar imagery from multiple incoherent frequency subband measurements [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(3): 398-404.
- [30] Tian J, Sun J, Wang G, et al. Multiband radar signal coherent fusion processing with IAA and apFFT [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(5): 463-466.
- [31] 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.
- [32] Li D, Li X, Qin Y, et al. Radar coincidence imaging: An instantaneous imaging technique with stochastic signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(4): 2261-2277.
- [33] Li D, Li X, Cheng Y, et al. Radar coincidence imaging in the presence of target-motion-induced error [J]. Journal of Electronic Imaging, 2014, 23(2):1-17.
- [34] 梁美彦,邓朝,张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(2):189-198.
Liang Meiyen, Deng Chao, Zhang Cunlin. THz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(2): 189-198.
- [35] 王瑞君,王宏强,秦玉亮,等. 太赫兹雷达技术研究与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 04001: 1-17.
Wang Ruijun, Wang Hongqiang, Qin Yuliang, et al. Research progress of Terahertz radar technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 04001: 1-17.
- [36] Abbasi M, Gunnarsson S E, Wadefalk N, et al. Single Chip 220- GHz active heterodyne receiver and transmitter MMICs with on-chip integrated antenna [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(2): 466-478.
- [37] Danylov A A, Goyette T M, Waldman J, et al. Terahertz inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter [J]. Optics Express, 2010, 18(15): 16264-16272.

作者简介:黎湘(1967-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:目标识别、微动特性、雷达系统,E-mail: lixiang01@vip. sina. com;高勋章(1972-),男,博士,副教授,研究方向:雷达成像,目标识别,E-mail: gaoxunzhang@nudt. edu. cn;刘永祥(1976-),男,博士,教授,研究方向:微动特性、目标识别,E-mail: lyx_bible@sina. com。