

# 海上舰船目标雷达成像算法

邢孟道<sup>1,2</sup>, 高悦欣<sup>1,2</sup>, 陈溅来<sup>1,2</sup>, 保铮<sup>1,2</sup>

1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071
2. 西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心, 西安 710071

**摘要** 海面舰船目标是海洋执法和军事活动中一类备受关注的目标,海面舰船目标的雷达成像是对舰船目标进行监视和侦察的重要手段之一。本文综述了海上舰船目标雷达成像中的关键步骤和技术,分析了海上舰船目标成像的关键步骤,介绍了实现这些处理步骤的原理和相应的算法,并展望了未来海面舰船目标雷达成像的发展方向。

**关键词** 海面舰船目标;合成孔径雷达成像;逆合成孔径雷达成像

地球表面70%以上是海洋,其中蕴含着丰富的资源矿产。随着世界的高速发展,人口数量急剧增加,对各类资源的需求也明显提升,有限的陆地资源逐渐变得匮乏。世界各国争相在海洋中进行着资源探测和采集,这些行为引发了各国在海洋上针对资源的争端。中国领海面积辽阔,资源丰富,吸引了周边各国的强烈关注,由于资源引起的海上争端逐渐加剧,围绕海洋资源产生的问题愈加明显。为了维护中国自身的经济利益、海洋权益以及国家安全,对国外各类非法进入中国领海的海面舰船目标进行高效的监视和探测日益显示出了其重要性。海上舰船目标雷达成像技术是一种重要的对海监视和侦察手段,可以全天时、全天候地获取海洋目标的外形信息,为海洋监视执法、军事侦察等活动提供了重要的支撑,弥补了光学、红外等其他监视侦察手段的不足。随着当今海洋资源重要性的逐步上升,海上目标的雷达成像技术也受到了人们的广泛关注,并极大地推动了这项技术的发展。为了更好地发展和完善海上舰船目标雷达成像技术,应当对已有的成果进行总结和归纳。立足于已有成果,进一步从目标的雷达回波中挖掘更多有用的信息,增强中国自身的海面目标监视和侦察能力。

海上舰船目标雷达成像技术涉及多个方面,包括:多舰船目标雷达回波数据的提取和分离,舰船目标未知平动的补偿以及目标的各个散射点的方位向聚焦等处理技术。为了实现这些处理步骤,研究人员从不同角度对舰船目标的成像进行分析,提出了许多有效的方法。本文首先分析不同雷达

平台的海上舰船目标雷达成像所面临的问题,对这些问题进行分类,之后介绍与之对应的处理方法。

## 1 海上舰船目标的成像问题描述

海上舰船目标的成像目的一般是对具有未知、复杂、摇摆状态的非合作目标上的散射点通过不同视角的雷达回波数据进行二维重建。相比卫星和飞机目标,舰船目标的未知复杂运动使得对舰船目标雷达成像较为困难。海上的舰船目标一般具有三轴摇摆,因此其摇摆比较复杂。目标的复杂摇摆状态使得对目标上各个散射点方位向聚焦成像较为困难;而目标的非合作性对运动补偿技术提出了较高的要求。以下先对雷达成像的原理进行介绍,再说明海面舰船目标成像面临的具体问题。

### 1.1 雷达成像基本原理

对于雷达成像,无论是合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)还是逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR),成像原理相同<sup>[1-2]</sup>。雷达二维图像的距离向分辨率来自雷达发射的大带宽信号,方位向分辨率来自散射点与雷达之间的距离改变形成的多普勒频率变化。以下从ISAR成像基本原理出发,说明雷达成像的方位向分辨率的来源。

目标方位向的高分辨率主要靠目标上的散射点所具有的不同多普勒频率来实现。如图1(a)所示,当目标以顺时针方向转动时,目标上各散射点的多普勒频率值不同。位于目标旋转中心上的散射点没有相对于雷达的径向运动,因此其

收稿日期:2017-09-25;修回日期:2017-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61301292)

作者简介:邢孟道,教授,研究方向为雷达成像、地面动目标检测,电子信箱:xmd@xidian.edu.cn

引用格式:邢孟道,高悦欣,陈溅来,等. 海上舰船目标雷达成像算法[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 53-60; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.005

回波的多普勒频率值为0,而在中心右或左边散射点的多普勒频率值分别为正或负,且离旋转中心越远,多普勒的值越大。将各个距离单元的回波信号分别通过傅里叶分析变换到多普勒域,在多普勒分辨率足够高的条件下,即可将各个距离单元散射点的横向位置分布表示出来。

如图1(b)所示,在相邻两次观测中目标相对于雷达视线

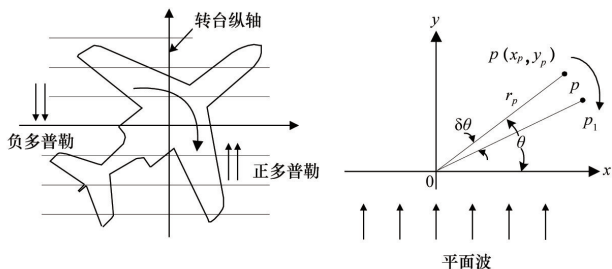


图1 转台目标成像示意

Fig. 1 Imaging of a rotating target

转过了一个很小的角度 $\delta\theta$ ,目标上某一散射点则从 $p$ 点移到了 $p_1$ 点,其纵向位移可以表示为

$$\Delta y_p = r_p \sin(\theta - \delta\theta) - r_p \sin\theta = -x_p \sin\delta\theta - y_p(1 - \cos\delta\theta) \quad (1)$$

式中, $x_p, y_p$ 为散射点 $p$ 相对于目标旋转中心的坐标,且 $x_p = r_p \cos\theta, y_p = r_p \sin\theta$ 。纵向位移 $\Delta y_p$ 引起回波的相位变化为

$$\Delta\phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta y_p = -\frac{4\pi}{\lambda} [-x_p \sin\delta\theta - y_p(1 - \cos\delta\theta)] \quad (2)$$

当 $\delta\theta$ 很小时,式(2)可近似为

$$\Delta\phi_p \approx \frac{4\pi}{\lambda} x_p \delta\theta \quad (3)$$

式(3)表明,两次回波的相位差正比于横距 $x_p$ 。该散射点相邻的2个回波相差的相位因子为 $\exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\delta\theta x_p\right)$ ,当目标连续转动时,回波的相位变化表现为多普勒频率, $x_p$ 越大,则该散射点回波的多普勒频率也越高。如果目标均匀转动,并在观测过程中接收到 $M$ 次回波。目标的总转角 $\Delta\theta = M\delta\theta$ ,当两散射点的横向距离差为 $\Delta x$ 时,两散射点回波总的相位差为

$$\Delta\Phi_M = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\theta \Delta x \quad (4)$$

用傅里叶变换进行多普勒分析时,只要 $\Delta\Phi_M \geq 2\pi$ ,两点即可分辨,对应的横距分辨率 $\rho_a$ 为

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (5)$$

由式(5)可见,目标的方位向分辨率 $\rho_a$ 主要由目标相对于雷达视线的转角决定。高的方位向分辨率来源于大的观测角。从以上分析还可以看出,对目标进行方位向的高分辨成像,本质就是要提取目标回波信号中的多普勒频率分量,因为不同的多普勒分量正对应着目标上的散射点。

## 1.2 舰船目标成像特性

舰船目标是一类非合作目标。它的运动参数是未知的,因此无法直接利用SAR成像算法来对其进行处理。由于舰船目标的非合作性质,一般对其使用ISAR成像算法进行成

像。ISAR成像算法一般分为包络对齐、相位校正和方位向成像处理3个部分。其中包络对齐和相位校正的主要目的是去除目标自身移动对回波的影响,包括距离上的徙动和相位上的影响。然而,ISAR成像算法一般只能对单个目标进行处理,对于机载和星载雷达,很难保证雷达波束内只有1个目标。因此对于机载和星载雷达,在进行海上舰船目标成像处理之前,需要对回波中的舰船目标进行提取和分离。在得到单个目标的回波数据之后,再使用ISAR成像算法来对目标进行成像。

另一方面,海上舰船目标由于受到海面波浪的影响,会产生三轴摇摆,也会增加舰船目标的成像难度。海上舰船目标每一维度的摇摆幅度一般使用钟摆模型描述。三轴的摇摆一方面使目标的有效转速发生变化,导致散射点的多普勒频率具有较为明显的时变特性,另一方面还会使成像的投影平面发生变化,以下介绍舰船目标的摇摆特性<sup>[3]</sup>。

舰船目标受海浪影响发生的转动如图2所示。

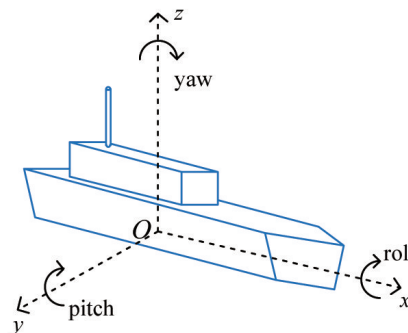


图2 海上舰船目标的摇摆示意

Fig. 2 Rotation of a ship target on the sea

图2中船首方向为 $x$ 轴,与船首方向垂直且平行于船身平面的方向为 $y$ 轴,与船身平面垂直的方向为 $z$ 轴。一般定义围绕 $x$ 轴的摇摆为横滚(roll)摇摆;围绕 $y$ 轴的摇摆为俯仰(pitch)摇摆,围绕 $z$ 轴的摇摆为偏航(yaw)摇摆。设 $t$ 时刻横滚、俯仰、偏航摇摆的最大幅度为 $\alpha_r(t), \alpha_p(t)$ 和 $\alpha_y(t)$ ,那么这3个分量可以表示为

$$\begin{cases} \alpha_r(t) = q_r \sin\left(\frac{2\pi t}{T_r} + \varphi_r\right) \\ \alpha_p(t) = q_p \sin\left(\frac{2\pi t}{T_p} + \varphi_p\right) \\ \alpha_y(t) = q_y \sin\left(\frac{2\pi t}{T_y} + \varphi_y\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $q_r, q_p$ 和 $q_y$ 为横滚、俯仰和偏航摇摆最大摆幅; $T_r, T_p$ 和 $T_y$ 为横滚、俯仰和偏航摇摆的摇摆周期; $\varphi_r, \varphi_p$ 和 $\varphi_y$ 为横滚、俯仰和偏航摇摆的初始相位。

由式(6),可见舰船目标自身摇摆状态由一个具有9个自变量的函数决定,因此舰船目标的摇摆非常复杂,导致了目标散射点回波的多普勒值具有较强的时变性质。

舰船目标自身较为复杂的摇摆状态和非合作性使得对海面舰船目标的雷达成像算法具有特殊性。不同的雷达安装平台也对成像算法有影响。随着目前对海面目标关注度的提升,针对海面舰船目标的成像雷达被安装在多种平台上,极大地提升了海面目标的观测和监视能力。目前,具备海上目标成像能力的雷达被安装在卫星、飞机、岸基和舰船上。这些平台具备不同的观测范围、运动方式及观测能力。

卫星和飞机平台的成像雷达由于平台的体积限制和任务需求,其雷达波束宽度一般较大,覆盖区域较广。因此大多数情况下,其波束覆盖范围中存在多个舰船目标。此外,还混杂着陆地、岛屿和其他目标。对于卫星和飞机平台,要实现舰船目标成像,首先要从数据中提取属于单个舰船目标的回波数据,再进行成像。

岸基雷达和舰载雷达<sup>[3-4]</sup>一般对雷达体积的限制较小,其天线尺寸较大,可以形成较窄的波束,能够保证雷达波束内一般同一距离单元内只有1个目标。因此可以对岸基或者舰载雷达采集到的回波直接进行ISAR成像处理。但是相应的,由于岸基雷达自身无法移动,目标成像所需要的转角主要依靠目标自身的摇摆产生。

根据以上分析看出,海面舰船目标成像的4个较为重要问题是:1) 舰船目标提取和分离;2) 舰船目标的运动补偿;3) 海上舰船目标的成像时间段选取;4) 海上舰船方位向聚焦和方位向定标。图3给出了海面舰船目标的成像关键步骤的划分。

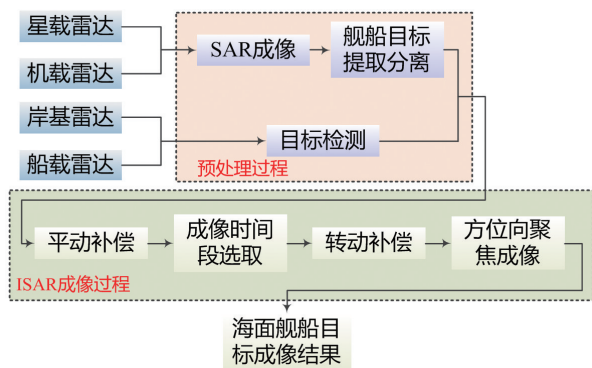


图3 海面舰船目标的成像关键步骤

Fig. 3 Key steps for the imagery of ship targets on the sea

## 2 舰船目标回波数据的提取分离

由于星载和机载雷达的照射范围较大,雷达波束覆盖范围内往往有多个目标。在进行ISAR成像前,需要将舰船目标的回波与其他目标的回波进行区分,并提取出只包含舰船目标的数据,再分离出单个舰船目标的回波进行ISAR成像处理;或者在海情不高、目标自身运动不明显的条件下直接对多舰船目标进行成像<sup>[5]</sup>。一般机载/星载SAR无法直接实现海面舰船目标的高精度成像。机载/星载SAR雷达的自身运动参数可以通过这些平台上安装的设备测量和记录获得,而

场景中的舰船目标却是非合作的目标,导致舰船目标与雷达之间的斜距变化历程变为未知,这使一般的SAR成像算法无法有效对舰船目标进行高精度的成像。因此机载/星载SAR在实现舰船目标成像时,首先要从场景中提取出目标,再利用ISAR成像算法对每个舰船目标进行单独成像。

图4给出了SAR对海面多目标的成像结果,图5为提取的目标成像结果,可见仅利用SAR成像手段无法对非合作目标进行聚焦成像,但可以对目标进行分离。一般位于不同距离单元的目标可以通过一维距离像实现分离,同一距离单元的目标要通过多普勒频率区别进行分离。图4中A和C目标位于同一距离单元,在多普勒域可以将其分开并分别处理。

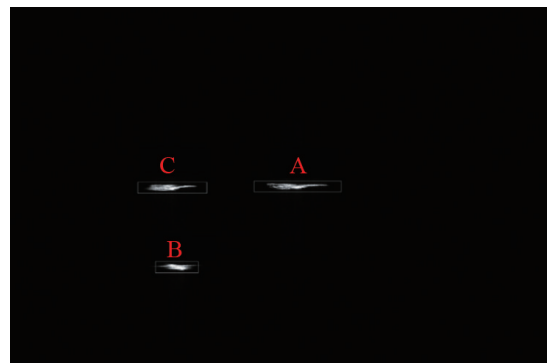
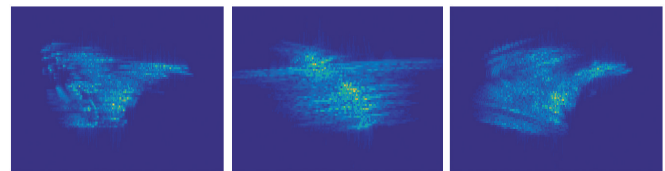


图4 多舰船目标SAR成像结果

Fig. 4 SAR imaging result of multiple ship targets



(a) A舰船目标数据提取 (b) B舰船目标数据提取 (c) C舰船目标数据提取

图5 图4中的舰船目标提取结果

Fig. 5 Imaging results of the ship targets in Fig.4

从一幅包含复杂背景中的数据中提取出舰船目标的数据,并对各个目标进行分离是机载/星载SAR对舰船目标成像的一个关键步骤。对此,李震宇<sup>[6]</sup>提出首先对回波数据进行SAR粗成像,再利用图像处理的方法和目标的像素统计特性不同实现舰船目标与陆地等其他目标的分离,之后提取出单个的舰船目标并利用ISAR成像算法对目标进行成像。李亚超等<sup>[7]</sup>提出使用广义keystone变换和调频率估计算法首先校正舰船目标的包络徙动,再直接对舰船目标进行成像。该方法不考虑舰船目标自身的摇摆对成像造成的影响,在海情较低的条件可以高效地实现多舰船目标的同时聚焦成像。马瑜杰等<sup>[8]</sup>提出首先利用SAR成像算法对场景进行较长时间的成像,再从复图像中提取舰船目标并进行方位向逆匹配滤波,恢复出单个目标的数据,最后使用ISAR成像算法进行成像。汪玲等<sup>[9]</sup>提出利用聚焦的SAR图像估计场景中舰船目标

的位置参数,并根据这些参数从原始数据中提取舰船目标的回波数据。该方法可以应对舰船目标包络重叠较少时的情况。汪玲等<sup>[10]</sup>同样先从SAR图像中提取舰船目标,并考虑了舰船目标在成像时由于自身转轴指向变化引起的成像平面变化问题,提出利用计算多普勒频率展宽和船体中心线斜率来判断成像时的海情大小,并选出特定的成像时间段,使得成像结果是目标的侧视图或者是俯视图。

对于岸基/船载成像雷达来说,由于其一般具有较大尺寸的天线,可以形成较小的波束宽度,因此一般可以保证波束范围同一距离单元内只有1个舰船目标,而距离向上的多个目标可以根据目标的一维距离像进行区分。对于岸基/船载雷达来说,比较重要的是要发现舰船目标,并对其进行跟踪,使雷达波束长时间的覆盖目标,陈小龙<sup>[11]</sup>、何友等<sup>[12]</sup>提出了相应的算法,高效地实现了舰船目标的检测和跟踪。

### 3 海上舰船目标运动补偿算法

提取和分离出单个舰船目标的数据后,再用ISAR成像处理流程。ISAR成像算法一般有3步:1) 平动补偿;2) 转动越距离单元徙动校正;3) 方位向聚焦成像。平动补偿一般包含2个步骤,第1步为包络对齐,其目的在于消除目标整体与雷达的相互运动引起的目标越距离单元徙动影响,根据舰船目标成像特性,目标在ISAR成像积累时间段内,应当是转台目标,且其各个散射点应当在特定的距离单元内,不发生越距离单元徙动。但实际情况中,该条件一般无法满足,需要通过平动补偿技术实现;第2步为相位自聚焦,其目的在于消除目标整体与雷达的相互运动引起的相位影响。平动补偿作为ISAR成像的基本运算步骤,已经有大量的相关文献对其进行介绍。一般运动补偿可以分为非参数化方法和参数化方法。

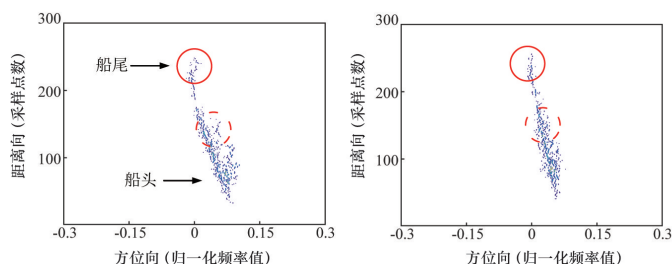
由于早期处理器件的性能限制,为了实现对大带宽时宽信号的处理,雷达多采用Dechirp接收体制,该体制使得回波信号退化为非相干信号。这导致待补偿的斜距误差形式比较复杂,一方面斜距误差和目标与雷达之间的相对运动有关,另一方面还与Dechirp体制下的参考斜距变化有关。故Dechirp体制下的运动补偿大多不限制误差的形式<sup>[1-2]</sup>。随着技术的发展,雷达系统的采集和处理能力有了长足的进步,不借助Dechirp处理也能实现对大带宽时宽信号的采集和处理,使得目标的回波信号保持了相干性。在相干回波条件下,雷达与目标之间的斜距变化在较短时间内可以使用阶数不高的多项式近似,这意味着相干条件下的运动误差形式已知,可以认为对误差有了一些先验信息。故在相干雷达系统条件下,可以通过确定多项式的系数方法实现平动补偿,统一地校正目标整体与雷达之间的斜距变化对目标包络和相位的影响。其精度要明显高于非参数化运动补偿。另外,由于低阶的多项式形式的相位补偿函数对目标自身旋转形成的相位变化影响较小,采取参数化方法的运动补偿可以更好

地保留目标的转动信息,避免了平动补偿后续对目标转动参数的影响。杨磊等<sup>[13-15]</sup>将舰船目标与雷达之间的斜距变化用多项式进行描述,以目标的成像质量为目标函数,使用不同的方法对多项式的各阶系数进行搜索,实现了高精度的目标平动补偿。

平动补偿完成后,需要进一步消除目标转动带来的越距离单元徙动。一般对于转角不大的目标,转动引起的越距离单元徙动表现为越距离单元走动,即各个散射点在距离向的走动可以使用线性函数描述。Keystone变换可以较为精确地补偿此类转动引起的线性走动。对于舰船目标,一般转角不会很大,因此Keystone变换能够实现目标转动引起的距离单元徙动校正<sup>[1]</sup>。当完成各补偿步骤后,需对数据进行分析,选出一些适合成像的时间段进行成像。

### 4 海上舰船目标成像时间段选取方法

由舰船目标成像特性可知,高海情时,舰船目标在海上会发生类似于钟摆的运动,目标上散射点回波的多普勒值随时间发生较为复杂的变化。如果直接对舰船目标进行方位向处理,目标散射点回波的多普勒值随时间变化,常规的信号频率估计手段无法对复杂的时变多普勒频率进行精确估计,因此要选择一段变化相对小的信号进行处理。针对此问题,孙海平<sup>[3]</sup>提出使用多普勒中心估计算法来估计目标的摇摆状态,并指出目标多普勒中心呈现线性变化的时间段是成像的最佳时间段。其原因是多普勒线性变化段可以形成较大的调频斜率,便于参数化时频分析算法进行频率估计并成像。高悦欣等<sup>[16]</sup>从成像平面和分辨率的角度出发,提出选择目标多普勒中心变化较为平缓的时间段进行成像,原因是多普勒变化平缓的时间段内目标的转速最大,形成的带宽最大,目标图像具有较高的分辨率;同时目标的成像平面也比较稳定。挑选出最佳成像时间段后,使用成像算法对该数据进行处理,分析和提取信号中的各个多普勒频率成分,实现目标方位向的高分辨成像。图6给出了不同成像时间段的成像结果。可以看出图6(a)的效果明显优于图6(b),可见成像时间段的选取对成像结果的影响较大。



(a) 合适的成像时间段成像结果 (b) 不合适的成像时间段成像结果

图6 不同成像时间段的成像结果  
Fig. 6 Imaging results of different intervals

## 5 海上舰船目标成像算法

海上舰船目标成像算法的设计一般从3个方面进行考虑,1) 使用非平稳信号处理手段,非平稳信号处理可以应对目标散射点的多普勒频率值时变的问题;2) 尽可能地缩短成像时间,这可以保证成像时间段内,目标上各散射点的多普勒频率随时间的变化较小;3) 参数模型化成像,该方法以匀速或者匀加速转动模型描述目标的转动,不但可以实现对目标的聚焦成像,还可以实现目标的方位向定标。从不同的方面对成像进行考虑,可以设计不同的成像算法。图7给出了海上舰船目标成像算法的分类。

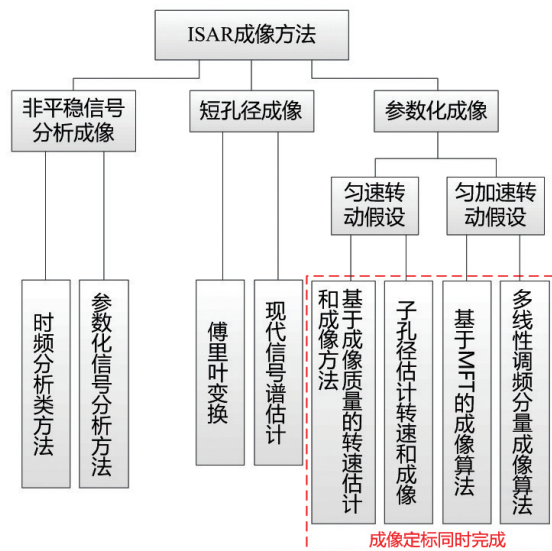


图7 海上舰船目标成像方法分类

Fig. 7 Imaging algorithms for ship targets on the sea

### 5.1 基于非平稳信号的ISAR成像方法

一类有效的舰船目标成像算法是基于非平稳信号分析算法的成像算法。非平稳信号处理算法将信号的频率视为随时间变化的函数,目的是恢复出信号在每个时刻的频率值,其在诸多工程领域都得到了应用。Bai等<sup>[17]</sup>提出使用非平稳信号的时频分布对舰船目标进行成像。这种方法提出首先计算舰船目标回波的每个距离单元信号的时频分布,再提取某个时刻的时频分布结果按照距离单元进行组合实现成像。这类方法可以看作无参数的时频分析方法,可以应对复杂时频信号的分析问题,但是该方法容易受短窗频率分辨率低、长窗频率分析不准确的影响。保铮等<sup>[13]</sup>将目标散射点转动形成的多普勒频率近似为线性调频信号,之后对这些线性调频信号进行检测并估计它们的参数。这一类方法实现了海情较高条件下的舰船目标成像。保铮等<sup>[11]</sup>利用Radon变换来检测每个距离单元信号的Wigner-Ville时频分布中的直线,实现了复杂运动目标的成像,但是该方法忽略了线性调频信号分量幅度随慢时间的变化。邢孟道等<sup>[18]</sup>使用Dechirp处理估计信号分量的调频斜率,并结合Clean技术精确地估计各线性调频信号的初始相位、幅度变化和起始频率。该方

法能够更加高效和准确地实现线性调频信号的参数估计。另外由于该方法考虑了信号的幅度变化,使得最终成像结果的虚假点比较少。孙海平<sup>[19]</sup>提出利用Chirplet算法结合稀疏思想来提取线性调频信号并估计信号分量的参数,其本质仍然是Dechirp思想,不同之处在于Chirplet算法中直接将线性调频信号的幅度变化看成高斯函数。

由于实际舰船目标摇摆的复杂性,使用线性调频信号描述目标上散射点的多普勒频率变化是不够精确的,因此Gao等<sup>[19-20]</sup>提出使用频率值为二次变化的信号模型来描述舰船目标散射点的频率变化。之后,Zheng等<sup>[21-24]</sup>进一步推广了该方法,引入了更为复杂的信号模型,实现了精度更高的非平稳复杂信号参数估计。

### 5.2 基于超分辨算法的短孔径成像算法

缩短成像时间长度能够使所选时间段内的信号特性变得较为简单。如果成像的时间段足够短,信号在该时间段内可以被近似为平稳信号,即目标上各散射点的多普勒值不随时间变化。但是,傅里叶变换的精度受到信号长度的影响,当成像时间段较短时,使用傅里叶变换对目标成像会导致成像分辨率下降。因此为了保证成像分辨率不受影响,研究人员提出利用现代信号谱估计和压缩感知理论(compressed sensing,CS)对目标进行方位向成像。现代信号谱估计和CS理论都可以突破传统傅里叶变换的分辨极限,在较短信号条件下实现对目标的高分辨成像。Zhang等<sup>[25]</sup>提出一种可以在低信噪比条件下利用CS理论进行超分辨成像的方法。该方法认为在较短时间内目标回波信号频率不随时间变化,之后使用Burg算法对信号沿慢时间方向进行外推,增加信号在时间域的长度,再使用CS理论恢复信号中的各个频率分量。由于信号在时间域的长度增加,使得基于CS理论得到的频谱分辨率得到了提高,并且在较强的噪声条件下仍可获得较好的成像结果。Zhang等<sup>[26]</sup>提出一种考虑相位误差的基于CS理论的成像算法。该方法在进行迭代成像的过程中估计相位误差,可以实现存在相位误差条件下的短孔径高分辨成像。Xu等<sup>[27]</sup>分析了基于CS理论的成像算法中约束系数的物理意义,给出了相应的计算方法,使得基于CS理论的成像算法能够自适应地选取合适约束系数,保证获得质量较高的目标图像。基于CS算法的成像还有一个优势是可以对方位向数据有缺损(丢失回波)的回波信号进行成像<sup>[27]</sup>。岸基/车载雷达可能出现方位向回波有缺损的情况,这是因为岸基/车载雷达可能同时监视多个目标,在波束切换的过程中,可能会丢失目标,从而导致方位向回波的缺损。而基于CS理论的成像算法可以较好地应对该情况<sup>[28]</sup>。

### 5.3 参数化模型成像算法

缩短成像时间并使用超分辨算法进行成像可以实现较高精度的成像,但是该方法对目标的先验信息的利用并不充分。如果可以延长对目标的成像积累时间并结合目标自身的转动特性,能够进一步提高成像的分辨率。在一定的成像时间段内,可以将舰船目标的旋转近似为两类旋转,匀速转

动和匀加速转动。这两类模型的近似程度不同,相应的引起回波信号的表达形式不同。对于匀速转动近似,目标的回波信号中会存在随距离空变的线性调频信号误差,该误差的具体参数由旋转的速度和散射点所在的距离单元决定。因此,首先应当估计出目标的旋转速度,之后利用转速信息和距离位置信息对目标进行补偿和成像。同时也可以根据目标的转速,实现对目标的方位向定标,目标方位向的多普勒频率分辨单元与方位向距离的关系可以由式(5)计算。盛佳恋等<sup>[29]</sup>提出使用时变自回归(time-varying autoregressive, TVAR)模型来估计目标的转速。该方法首先从目标的成像结果中提取一些散射点,利用TVAR模型对选出的散射点的时变频率进行估计,再通过散射点时变的频率和距离位置信息进行目标转速估计。Sheng等<sup>[30]</sup>使用目标成像结果的锐化度作为目标函数,通过最优化方法迭代搜索目标的有效转速。Xu等<sup>[31]</sup>以最终成像结果的熵值作为目标函数,提出一种基于坐标梯度下降的方法搜索使成像质量最好的转速。

但由于舰船摇摆的复杂性,利用匀速转动对海上目标的摇摆进行描述,仍然不够精确。虽然使用匀速转动模型能够实现目标较为精确的转速估计和距离空变的相位误差补偿,目标散射点的方位向空变的相位历程对成像依然具有影响。此时使用匀加速转动模型能够获得更好的效果。徐刚等<sup>[32]</sup>对距离向脉冲压缩后回波信号的各距离单元以多线性调频信号分量进行建模,构造过冗余字典并使用CS理论估计每个距离单元内各个线性调频信号的参数实现转速和转动加速度估计和高精度的聚焦成像。盛佳恋等<sup>[33]</sup>使用匹配傅里叶变换(matched fourier transform, MFT)对目标进行成像。当MFT使用的参数正确时,可以克服方位向空变的相位误差的影响。因此盛佳恋等<sup>[33]</sup>以最终成像结果的成像质量为目标函数,使用最优化方法来搜索目标的最优转动速度和转动加速度,最后实现目标的高质量成像。图8给出了基于距离-多普勒(range-Doppler, RD)算法和MFT算法的成像结果对比,可以看出如果不考虑目标回波存在的空变相位误差,目标成像结果较差。而使用参数正确的MFT成像时,一方面可以应对目标的散射点回波相位的方位空变性质,还可以实现目标的方位向定标。对目标进行方位向定标后,目标成像中不正确

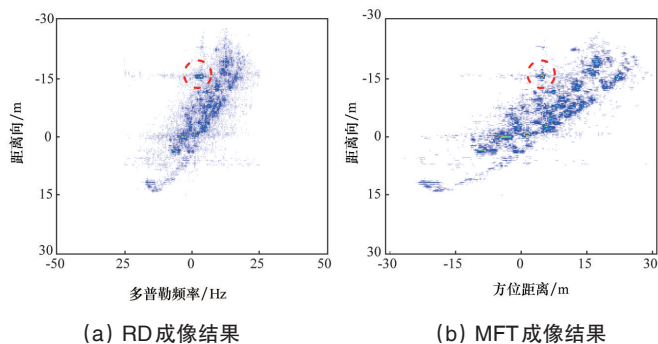


图8 不同成像算法结果对比

Fig. 8 Comparison between the imaging results obtained by different algorithms

的拉伸现象消失了,而且目标上各个散射点的聚焦程度也有了较大提升(注意图8中红圈标示的散射点)。

## 6 结论与展望

随着对海洋目标关注度的日益提升,舰船目标的成像技术仍在不断地发展和完善中。一方面成像的算法越来越多,基本上涵盖了大多数平台的成像需求;另一方面,由于算法性能的提升,提取出了更多与目标有关的信息。虽然目前舰船目标成像已经获得较多进展,仍有不足亟待解决。以下从3个方面说明未来海面目标的成像可能的发展方向。

### 6.1 超长时间积累成像

鉴于舰船目标复杂的摇摆性质,目前对舰船目标进行成像时,通常选取一段数据进行处理,以保证截取的数据段内频率变化较为简单,保证已有的处理算法可以较好地实现海面目标的成像。但是,截取信号等同于减少了信息量,导致从回波中获得的目標信息减少。如果能够对较长时间的回波数据进行成像,就能够获得目标更多信息,如可以提高成像结果的分辨率。因此,研究长时间的海面舰船成像是很有必要的。主要面临2个问题:1) 由于舰船目标的摇摆较为复杂,高精度的非平稳信号估计手段是非常必要的;2) 要保证目标上每个散射点的回波不发生越距离单元徙动。对于第1个问题,高精度、多分量的非平稳信号频率估计算法目前尚无报道。长时间成像积累情况下,舰船目标的散射点回波频率变化可能是连续变化、但形式未知的。此外还存在散射点被目标的其他部分遮挡之后又出现的问题,这种情况下目标上散射点形成的频率分量可能会忽然消失或出现,如何估计出回波中目标散射点信号的复杂变化是一个挑战。对于第2个问题,在成像时间不长的情况下,经过平动补偿和转动补偿可以将目标的各散射点回波尽可能地控制在其对应的距离单元内。但当积累时间较长时,目标的散射点可能会发生较为明显的越距离单元徙动,并且其形式还比较复杂,已有的方法无法有效校正长时间成像情况下的越距离单元徙动。因此还需要考虑长合成孔径时间条件下的目标包络校正问题。

### 6.2 海面舰船目标的三维成像

海面舰船目标复杂的三维摇摆使成像算法面临诸多挑战,但这种复杂的摇摆提供了更多的目标观测角度,理论上能提供目标的更多信息。舰船目标的摇摆比较复杂,一方面转速有变化,另一方面转轴的方向也会发生变化,使得成像平面也发生了变化。根据不同的成像平面,有可能实现舰船目标的三维成像。目前三维ISAR成像已经有了一定的研究成果,例如Xu等<sup>[34-36]</sup>提出的利用多个天线的干涉或者比幅法实现俯仰和水平两方向对目标散射点的测角,进而实现目标的三维成像。Wang等<sup>[37]</sup>也提出了基于图像序列的空间目标三维成像处理方法。但是这类方法尚未应用到舰船目标的三维成像中。对于目前常见的单天线的雷达,不具备多个通道,无法使用干涉或者比幅法进行成像。而现在已有的基于

图像的三维成像算法,需要对目标的运动状态进行估计。对于自身运动较为稳定的卫星或者飞机目标,运动状态估计较容易实现,而对于舰船目标,目前还难以实现。因此如何在单通道雷达基础上实现目标的三维成像仍是一个具有挑战性的研究方向。

### 6.3 舰船目标的部件级分解成像

舰船目标是一类人造的金属目标,包含了许多标准的散射体,如基本的球、二面角、三面角和圆柱体等<sup>[38]</sup>。传统成像算法将目标看成是一系列的理想散射点组合而成的目标,实际目标上的散射点具有较为复杂的电磁后向散射系数,它们的电磁后向散射系数不但会因为遮挡而消失,还会因为照射的角度、波段和极化方式而发生较为明显的变化。如果能够较为深入地挖掘目标各部件的回波特性,则有可能实现对舰船目标的部件级分解成像,这可以加深对目标的认知,挖掘更多目标的信息。例如能够根据目标结构上的特征区分舰船目标的种类和用途等功能。

### 参考文献 (References)

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [2] 邢孟道, 保铮, 王彤, 等. 雷达成像算法进展[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
Xing Mengdao, Bao Zheng, Wang Tong, et al. Advances in radar imaging algorithms[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [3] 孙海平. 基于实测数据的舰船目标 ISAR 成像算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
Sun Haiping. Study of ship ISAR imaging algorithm based on measured data[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [4] 高悦欣, 于勇, 张彬, 等. 船载 ISAR 对舰船目标成像特性分析[J]. 遥测遥控, 2013, 34(1): 7-12.  
Gao Yuexin, Yu Yong, Zhang Bin, et al. Analysis on characteristics of ship target imaging by ship-borne ISAR[J]. Journal of Telemetry, Tracking, and Command, 2013, 34(1): 7-12.
- [5] 刘亚波, 李亚超, 邢孟道, 等. 基于压缩感知的 SAR 对多舰船目标成像[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(3): 270-274.  
Liu Yabo, Li Yachao, Xing Mengdao, et al. SAR imaging for multiple ships based on compressive sensing[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(3): 270-274.
- [6] 李震宇. 机动平台 SAR 大斜视成像算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.  
Li Zhenyu. Study on high squint imaging algorithms for SAR mounted on maneuvering platforms[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [7] 李亚超, 周峰, 邢孟道, 等. 一种直升机的舰船 Dechirp 实测数据 SAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1794-1798.  
Li Yachao, Zhou Feng, Xing Mengdao, et al. An effective method for ship dechirp data imaging in helicopter SAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(8): 1794-1798.
- [8] 马瑜杰, 李亚超, 邢孟道. 机载雷达对多舰船目标的成像方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(4): 261-267.  
Ma Yujie, Li Yachao, Xing Mengdao. Study on airborne SAR/ISAR imaging of multi-ship targets[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(4): 261-267.
- [9] 汪玲, 朱岱寅, 朱兆达. 基于 SAR 实测数据的舰船成像研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 401-404.  
Wang Ling, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. Study on ship imaging using SAR real data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(2): 401-404.
- [10] 汪玲, 朱兆达, 朱岱寅. 机载 ISAR 舰船侧视和俯视成像时间段选择[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2835-2839.  
Wang Ling, Zhu Zhaoda, Zhu Daiyin. Interval selections for side-view or top-view imaging of ship targets with airborne ISAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(12): 2835-2839.
- [11] 陈小龙, 关键, 何友. 微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 123-134.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, He You. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. Journal of Radars, 2013, 2(1): 123-134.
- [12] 何友, 黄勇, 关键, 等. 海杂波中的雷达目标检测技术综述[J]. 现代雷达, 2014, 36(12): 1-9.  
He You, Huang Yong, Guan Jian, et al. An overview on radar target detection in sea clutter[J]. Modern Radar, 2014, 36(12): 1-9.
- [13] 杨磊, 熊涛, 张磊, 等. 应用联合自聚焦实现低信噪比 ISAR 成像运动补偿[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 63-71.  
Yang Lei, Xiong Tao, Zhang Lei, et al. Translational motion compensation for ISAR imaging based on joint autofocusing under the low SNR[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2012, 39(3): 63-71.
- [14] Li D, Zhan M Y, Liu H Q, et al. A robust translational motion compensation method for ISAR imaging based on keystone transform and fractional fourier transform under low SNR environment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(5): 2140-2156.
- [15] Liu L, Zhou F, Tao M L, et al. Adaptive translational motion compensation method for ISAR imaging under low SNR based on particle swarm optimization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(11): 5146-5157.
- [16] 高悦欣, 李震宇, 邢孟道, 等. 一种海面舰船目标 ISAR 成像时间段选择方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 27-32.  
Gao Yuexin, Li Zhenyu, Xing Mengdao, et al. New ISAR imaging interval selection method for ship targets on the sea[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2017, 44(2): 27-32.
- [17] Bai X R, Xing M D, Zhou F, et al. Adaptive S-method based ISAR imaging of maneuvering targets[C]//2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 249-252.
- [18] 邢孟道, 保铮. 外场实测数据的舰船目标 ISAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(12): 1271-1277.  
Xing Mengdao, Bao Zheng. ISAR ship imaging of real data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2001, 23(12): 1271-1277.
- [19] Gao Z Z, Li Y C, Xing M D, et al. ISAR imaging of maneuvering targets with the range instantaneous chirp rate technique[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2009, 3(5): 449-460.
- [20] 李亚超, 苏军海, 邢孟道, 等. 利用时间-调频率分布特性的复杂运动目标 ISAR 成像研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(1): 1-7.  
Li Yachao, Su Junhai, Xing Mengdao, et al. Research on ISAR imaging of multi-ship targets[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(4): 261-267.

- ing of the complexly moving target based on the time-chirp distribution[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2008, 35(1): 1-7.
- [21] Zheng J B, Su T, Liao G S, et al. ISAR imaging for fluctuating ships based on a fast bilinear parameter estimation algorithm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8): 3954-3966.
- [22] Li Y Y, Su T, Zheng J B. Inverse synthetic aperture radar imaging of targets with complex motions based on modified chirp rate-quadratic chirp rate distribution for cubic phase signal[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015, 9(1): 095036.
- [23] Zheng J B, Su T, Liao G S, et al. ISAR imaging for fluctuating ships based on a fast bilinear parameter estimation algorithm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8): 3954-3966.
- [24] Wang Y, Zhao B, Kang J. Asymptotic statistical performance of local polynomial Wigner distribution for the parameters estimation of cubic-phase signal with application in ISAR imaging of ship target[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(3): 1087-1098.
- [25] Zhang L, Xing M D, Qiu C W, et al. Resolution enhancement for inverted synthetic aperture radar imaging under low snr via improved compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(10): 3824-3838.
- [26] Zhang L, Qiao Z J, Xing M D, et al. High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(11): 4630-4651.
- [27] Xu G, Xing M D, Zhang L, et al. Bayesian inverse synthetic aperture radar imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1150-1154.
- [28] 李军, 邢孟道, 张磊, 等. 一种高分辨的稀疏孔径ISAR成像方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(3): 441-446.  
Li Jun, Xing Mengdao, Zhang Lei, et al. High resolution imaging method for the sparse aperture of ISAR[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(3): 441-446.
- [29] 盛佳恋, 张磊, 邢孟道, 等. 联合运动补偿的逆合成孔径雷达成像方位定标方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 859-865.  
Sheng Jialian, Zhang Lei, Xing Mengdao, et al. Joint method of motion compensation and cross-range scaling for inverse synthetic aperture radar imaging[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(5): 859-865.
- [30] Sheng J J, Xing M D, Zhang L, et al. ISAR cross-range scaling by using sharpness maximization[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 165-169.
- [31] Xu G, Xing M D, Zhang L, et al. Sparse apertures ISAR imaging and scaling for maneuvering targets[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(7): 2942-2956.
- [32] 徐刚. 稀疏信号处理在高分辨雷达成像中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
Xu Gang. Applications of sparse signal processing in high-resolution radar imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [33] 盛佳恋. ISAR高分辨成像和参数估计算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.  
Sheng Jialian. Study on ISAR high resolution imaging and parameter estimation techniques[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- [34] Xu G, Xing M D, Xia X G, et al. 3D geometry and motion estimations of maneuvering targets for interferometric ISAR with sparse aperture [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(5): 2005-2020.
- [35] 李军. 高分辨二维和三维ISAR成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.  
Li Jun. Study of approaches to high resolution two- and three-dimensional ISAR imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [36] 马长征, 张守宏. 舰船目标单脉冲雷达三维成像技术[J]. 电子科学学报, 2000, 22(3): 385-391.  
Ma Changzheng, Zhang Shouhong. Three-dimensional imaging technique of ship targets with monopulse radar[J]. Journal of Electronics, 2000, 22(3): 385-391.
- [37] Wang F, Xu F, Jin Y Q. 3-D information of a space target retrieved from a sequence of high-resolution 2-D ISAR images[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing: IEEE, 2016: 5000-5002.
- [38] Duan J, Zhang L, Xing M D. Polarimetric target decomposition based on attributed scattering center model for synthetic aperture radar targets[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2095-2099.

## A survey of the radar imaging algorithms for ship targets on the sea

XING Mengdao<sup>1,2</sup>, GAO Yuexin<sup>1,2</sup>, CHEN Jianlai<sup>1,2</sup>, BAO Zheng<sup>1,2</sup>

1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Collaborative Innovation Centre of Information Sensing and Understanding, Xidian University, Xi'an 710071, China

**Abstract** Ship targets are very important for the marine law enforcement and military operations. The radar imaging of ships plays an important role in the surveillance and reconnaissance of ship targets. This paper analyzes the key steps in the ship-target imaging and the corresponding technologies, including the related principles and algorithms. The new technologies which may emerge in the future for the ship-target imagery are discussed.

**Keywords** ship targets on the sea; SAR imaging; ISAR imaging

(责任编辑 傅雪)