

文章编号:1004-9037(2014)04-0526-07

海面舰船目标 ISAR 最优成像时间选择算法

朱岱寅¹ 俞翔² 汪玲¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 南京工程学院计算机工程学院, 南京, 211167)

摘要:通过分析高海情下海上舰船目标的三维摇摆对成像的影响,基于方差定义的平均多普勒展宽概念,提出了一种逆合成孔径雷达(ISAR)最优成像时间选择算法。该算法根据目标距离向先验信息估计出舰船的固有纵摇周期,利用该周期隔离微多普勒效应的干扰,并为多普勒展宽曲线的平滑提供了可靠依据,使得算法整个过程无需人工干预。该算法易实现且运算量较低,适用于实时应用。仿真和实测数据的处理结果表明,利用本文算法筛选出的数据段获得了较理想的成像结果。

关键词: ISAR; 最优成像时间; 多普勒展宽; 纵摇周期

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

Optimal Processing Time and Duration Selection Algorithm for ISAR

Zhu Daiyin¹, Yu Xiang², Wang Ling¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167, China)

Abstract: Through analyzing the influence of imaging of 3D rocking ship targets under heavy scale sea, as well as based on the concept of variance, an average Doppler spread definition is proposed to estimate the optimal processing time and duration for ISAR. In this algorithm, the ship natural pitching period is estimated through the information of the range direction, by which the micro-Doppler effect is eliminated and a reliable basis for smoothing Doppler spread curve is provided. The algorithm can work automatically instead of artificial intervention. The simulation and measured data processing results show that ideal ISAR images can be obtained by using the data segments selected by the proposed algorithm.

Key words: ISAR; optimal processing time; Doppler spread; pitching period

引 言

逆合成孔径雷达(ISAR)可以用来对海上舰船高分辨成像。对于海上舰船目标,在低海情下等效转动主要依赖于目标与雷达的相对巡航;而在高海情下,舰船受海浪涌动造成横摇、纵摇和偏航的三维运动成为等效转动的主要来源,而且上述三维运动在各自维度上总体呈现出周期性的特点。三维运动合成的等效转动矢量导致了舰船目标多普勒频率的时变特性,为了提高图像质量和方位向分辨

率,需要选择等效转动的角速度较大且平稳的数据段,该步骤称为最优成像时间选择。

实际应用中舰船目标都可视为非合作目标,因此需要根据回波信息筛选出符合要求的数据段。已有的经典算法主要可以分为两类:基于图像图形分析的筛选算法^[1-6]和基于估计目标散射点多普勒信息的筛选算法^[15-23]。第一类经典算法不假设舰船运动的任何信息,仅通过估计目标图像的参数或者提取图像特征估计目标的运动特性。比较有代表性的算法如文献[9]和文献[10],其中文献[9]提出了一种基于图像对比度的筛选方法,该算法需要

对最优成像时刻与时段两个变量交替迭代以获得最优的成像数据段,算法的计算量较大;文献[10]通过数字图像处理技术提取目标的图像特征,并通过测算目标甲板线之间的展宽程度来确定最优成像数据段,该算法可以区分目标的俯视图和侧视图,但计算量较大且图像预处理部分需要人工干预设定阈值。第二类经典算法通过计算目标散射点的多普勒展宽或者多普勒中心估计目标的运动特性。文献[15]介绍了一种基于多普勒频率估计的数据段筛选算法,该算法需要人工干预跟踪特定距离门的散射点频率变化;文献[16]通过估计目标的多普勒展宽实现最优成像数据段的筛选,但该算法仅计算目标在几个特定距离单元内的多普勒展宽的平均值,也需要人工干预选择距离单元。

本文通过研究高海情下舰船目标的运动特点,提出了一种基于目标多普勒展宽估计的最优成像数据段选择算法。算法根据舰船运动特征和距离向信息等先验知识,适当假设了目标部分运动参数,实现了最优成像数据段的自动、快速筛选,并使得筛选出的数据段在方位向分辨率和图像质量之间获得合理的折中,算法计算量适中,适合实时应用。

1 海上舰船目标运动模型

海上舰船目标运动通常较为复杂,其中对成像贡献较大的运动分别为:相对巡航、纵摇、横摇和偏航运动。在低海情下,主要依靠雷达载机与舰船的相对巡航获得成像所需的多普勒频率,等效转动矢量偏向于垂直转动轴,一般可以得到舰船的俯视图;在高海情下,目标自身摇摆较为强烈,其中横摇最强,其次为纵摇,偏航较弱,而载机相对舰船的飞行转动矢量相对最弱,等效转动矢量偏向于水平转动轴,这时可以得到目标的近似侧视图。实际上要想获得理想的侧视图,如图 1 所示,还与雷达观察目标的视角 β 有关(RLOS 在海平面上投影与舰船纵轴的夹角)。视角 β 越接近 $\frac{\pi}{2}$,目标的纵摇对成像的贡献越大,则成像获得的侧视图与目标真实的侧视图越接近^[24]。本文将研究该情况下的舰船目标最优成像时间的选择问题。

舰船目标受海浪涌动的影响,其纵摇是时间的函数而且是符合正弦函数的周期性运动,因此摇摆对应的角速度 ω 为

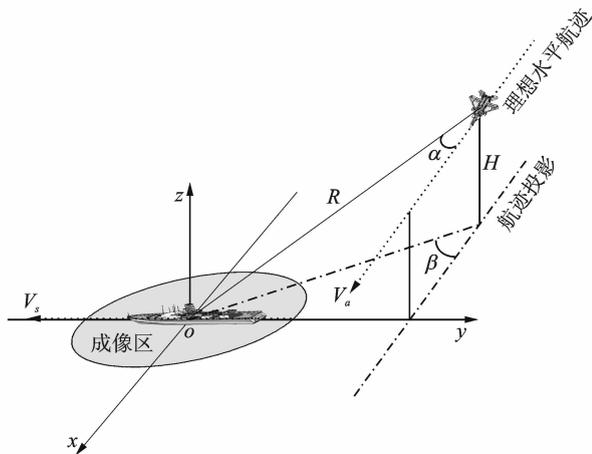


图 1 成像几何关系
Fig. 1 Imaging geometry

$$\omega = \frac{\pi A}{T} \cos(2\pi \frac{t}{T} + \varphi_0) \tag{1}$$

式中: A 为摇幅, T 为摇摆周期, φ_0 为初相。舰船纵摇周期 $ship_T$ 主要取决于船的长度 $ship_L$ ^[25]

$$ship_T = \eta * \sqrt{ship_L} \tag{2}$$

式中 η 因子在海中的舰船可以设为 0.7,船的长度 $ship_L$ 信息可以从目标初像的距离向获取。通过上式可以得到舰船的大致纵摇周期。

假设舰船围绕旋转中心 o 纵摇,如图 2 所示,对于 RD(Range Doppler)成像算法,舰船的上部分建筑对成像的贡献较大,有

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \omega r \sin\theta = \frac{2}{\lambda} \omega h \tag{3}$$

式中: θ 是散射点与舰船纵轴的夹角, h 为散射点高度, ω 为角速度, λ 为波长。可以看出在角速度一定的情况下,目标上散射点的多普勒频率 f_d 与散射点的高度 h 线性相关。实际上由于舰船的纵摇角速度呈快速周期性变化,所以大多数时间内角速度并不是恒定的,这是造成目标图像方位向散焦的主要原因之一。为了得到目标清晰的像,需要对全孔径时间内的数据筛选,尽量选择目标接近匀速运动的时间段。

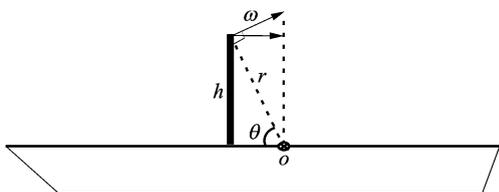


图 2 纵摇情况目标运动模型
Fig. 2 Target motion model of pitch

2 目标最优成像时间选择

2.1 平均多普勒展宽

如上节所述,最优成像时间的选择问题就是筛选目标角速度最大且平稳的时间段。由式(3)中角速度与多普勒频率的关系可知,该问题可以等效为求解目标多普勒展宽最大且稳定的时间段。由式(3)舰船上散射点的高度与多普勒展宽的对应关系可知,选取目标上位置较高的散射点(如舰船的桅杆或者较高的建筑等)作为样本可以提高多普勒展宽的估计精度,但是这种方法稳健性较差且需要人工干预筛选样本。本文采用了全部距离门作为样本估计目标的平均多普勒展宽,有

$$P = \sum_{n=1}^{N_r} |p_n| \quad (4)$$

式中: $|p_n|$ 表示第 n 个距离门的包络, N_r 表示距离门个数, P 表示各距离门平均得到的方位向和包络。

$$F(m) = \frac{P(m)}{\sum_{m=1}^{N_a} P(m)}, \quad m = 1, 2, \dots, N_a \quad (5)$$

$$E = \sum_{m=1}^{N_a} m \cdot F(m), \quad m = 1, 2, \dots, N_a \quad (6)$$

$$V = \sum_{m=1}^{N_a} F(m)(m - E)^2, \quad m = 1, 2, \dots, N_a \quad (7)$$

用式(5)对和包络归一化,即可以将 $F(m)$ 视为概率密度函数,从而通过式(6)和式(7)分别求解和包络的数学期望和方差。众所周知,方差可以用来度量随机变量与其数学期望之间的偏离程度,这与多普勒展宽的物理意义吻合,所以这里将方差等效为目标的平均多普勒展宽,如式(7)所示。

2.2 微多普勒干扰隔离

实际情况下还需要考虑船体上的微多普勒效应,如舰载机旋转的螺旋桨、转动的雷达天线、风速仪等,如图3所示,方框处标记了舰船上的微多普勒效应区域。

通常情况下,与舰船摇摆产生的多普勒展宽相比,上述微多普勒展宽较大,对目标多普勒展宽估计是一种干扰。为了能够获得较为准确的目标样本,需要保护目标的方位向分辨单元,以隔离大部分微多普勒干扰。为此,需要得到舰船最大的可能展宽,以纵摇为例

$$F_{\text{pitch}} = \frac{2V}{\lambda} \quad (8)$$

$$V = \frac{A_{\text{pitch}}}{T_{\text{pitch}}} \times H \quad (9)$$

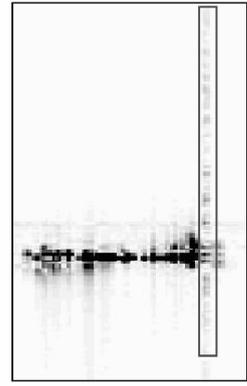


图3 微多普勒效应

Fig. 3 Micro-Doppler effect for the target

$$H \leq L/2 \quad (10)$$

式(8)中 F_{pitch} 为纵摇运动贡献较大的情况下舰船的最大多普勒展宽;式(9)中 A_{pitch} 为该船的最大可能纵摇幅度(双倍), T_{pitch} 为纵摇周期;式(10)中需要说明的是舰船的高度(最高点) H , 绝大多数舰船吃水线以上的建筑高度都小于等于该船长度 L 的 $1/2$, 所以这里取 $L/2$ 作为 H 的近似值。由此可以得到目标的方位向保护单元

$$\text{NUM}_{\text{ptc}} = \lceil F_{\text{pitch}} / \text{PRF} \rceil \quad (11)$$

2.3 多普勒展宽曲线的平滑处理

海上舰船目标的多普勒展宽基本上呈现出正弦函数的形式,但其多普勒展宽曲线并不平滑,为了能够准确获取曲线峰值和谷值的位置,需要对曲线进行平滑处理。传统的平滑方法多采用曲线拟合的思路,该类方法通过人工干预调整拟合参数或者拟合算法可以降低拟合误差,但是原曲线中存在的高频干扰分量,使得拟合曲线并不能准确反映出目标多普勒展宽的真实情况。为了提高曲线平滑的处理速度和准确性,对原多普勒展宽信号在频域加窗,利用低通滤波实现曲线平滑处理。

首先需要确定窗宽。由图4(a)舰船目标的多普勒展宽信号和图4(b)的等效转动角速度的对应关系可知,前者频率应该为后者频率的2倍。因此低通滤波的窗宽可以由舰船目标的摇摆频率决定,如下式所示

$$\text{dopp}_{\text{ship}} = (1/T * 2) \quad (12)$$

$$\text{win} = \alpha * 2 * \text{dopp}_{\text{ship}} \quad (13)$$

式(12)中 $\text{dopp}_{\text{ship}}$ 表示多普勒展宽信号的频率;式(13)中由于 $\text{dopp}_{\text{ship}}$ 信号为实信号,所以窗宽 win 应该为该信号频率的2倍, α 表示过采样因子,一般取值为1.5。

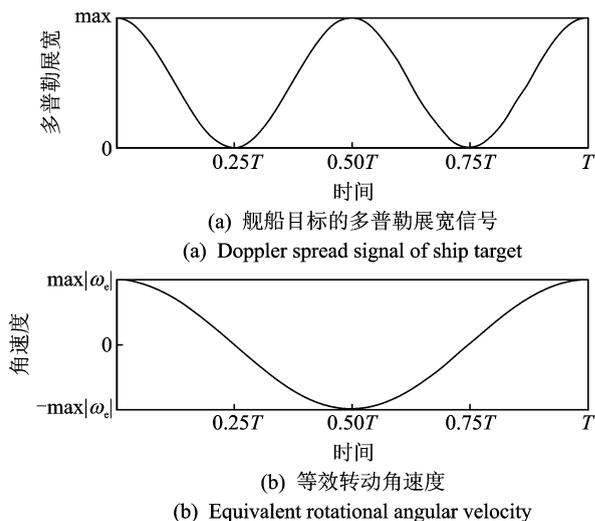


图 4 多普勒展宽信号与等效转动角速度的对应关系
Fig. 4 Corresponding relationship between Doppler spread and equivalent rotational angular velocity

对曲线平滑处理方法的步骤如下:(1)将多普勒展宽曲线变换到频域;(2)以频域峰值位置为中心加矩形窗,窗宽按照式(12)和式(13)设定;(3)变换回时域得到平滑曲线,该曲线平滑方法不用人工干预且效率较高。

经过平滑处理之后的多普勒展宽曲线呈现出明显的峰值区域和谷值区域。其中峰值区域是目标等效转动最为显著的区间,也是其散射特性最不稳定的区间;而谷值区域是目标等效转动接近于静止的区间,此时其散射特性较为稳定,因此有利于确定谷值所在位置。根据多普勒展宽为近似正弦函数的假设,选择相邻的谷值位置作为参考点,间接取得峰值位置,这样就得到了最优成像时间的中心脉冲。此外,谷值之间的数据段都是合理的成像积累脉冲(时段),结合文献[1]介绍的基于图像对比度的最优成像时间选择算法,可以高效地选择出最优的成像积累脉冲数。图 5 是本文算法的流程图。

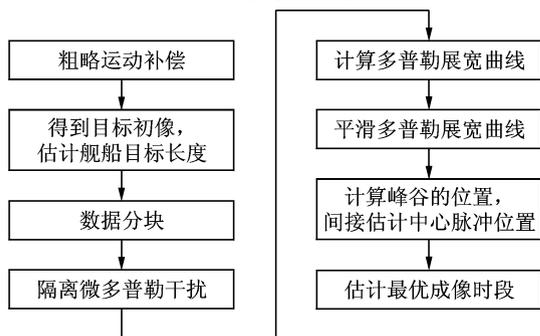


图 5 算法流程图
Fig. 5 Algorithm flowchart

由图 5 可知,上述步骤中只是在获得目标图像的步骤需要用到快速傅氏变换,其他步骤的运算以向量的一维乘加为主,算法的运算量较低。

3 实验结果与分析

3.1 舰船目标仿真实验

本节将通过仿真实验分析视角 β 接近 $\frac{\pi}{2}$ 且较大海情下最优成像时间选择算法的性能。仿真目标为多散射点驱逐舰模型,目标的三视图如图 6 所示,模型共包含 301 个散射点,各散射点坐标间距为 5 m。

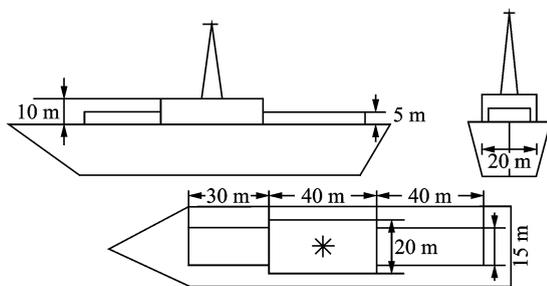


图 6 驱逐舰模型三视图
Fig. 6 Orthographic views of destroyer model

仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	取值	参数	取值
工作波长	0.032 m	视角 β	95°
带宽	300 MHz	舰船速度	20 节
PRF	400 Hz	载机速度	50 m/s
雷达高度	2 km	偏航	$1.3^\circ \sin(2\pi/14.2t)$
径向距离	50 km	横摇	$19.2^\circ \sin(2\pi/12.2t)$
		纵摇	$3.4^\circ \sin(2\pi/6.7t)$

表 1 中参数模拟的场景是 5 级海情且载机与驱逐舰存在相对运动的情况。根据算法流程,首先要对距离向压缩完毕的回波数据分块,并经过粗略的运动补偿后,用本文提出的算法分别计算每个分块的多普勒展宽,如图 7(a)所示,平滑后的曲线滤除了原信号中的高频干扰,并且与估计的多普勒展宽曲线在峰值和峰谷位置准确吻合;通过第 2 节分析的多普勒展宽与等效角速度的对应关系可知,图 7(a)平滑后的多普勒展宽曲线能够与图 7(b)的真实等效角速度曲线正确对应。

分别以图 7(a)中箭头 1~4 所指的四个位置为中心脉冲利用 RD 算法成像,其中位置 2 即本文算法估计的最优成像时间中心脉冲,该位置对应的

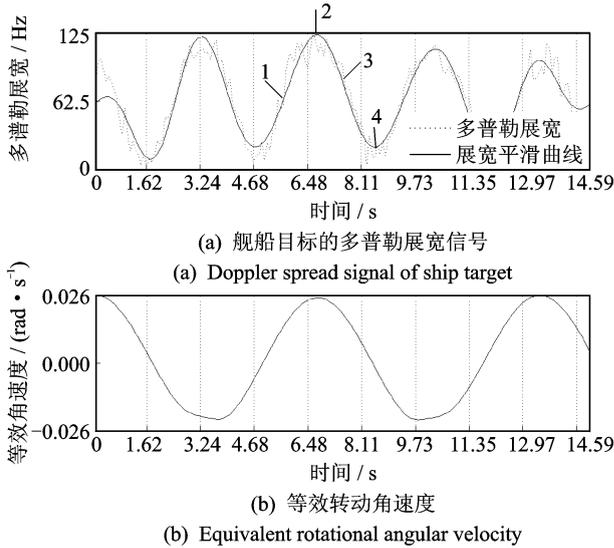


图 7 仿真舰船目标的多普勒展宽信号与等效转动角速度
Fig. 7 Corresponding relationship between Doppler spread of simulation ship target and equivalent rotational angular velocity

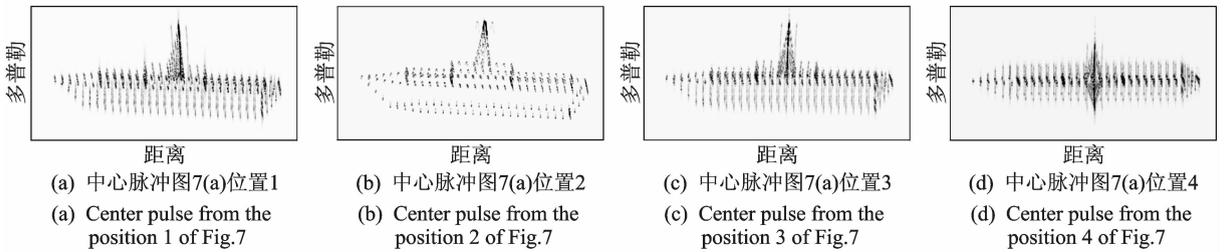


图 8 仿真舰船目标成像结果
Fig. 8 Imaging results of the simulation ship target

普勒展宽得到图 9。与仿真数据相比实测数据对应的多普勒展宽曲线更加复杂,得益于本文算法对多普勒展宽曲线的平滑效果,从图 9 可以看出平滑后的曲线滤除了大部分高频干扰,且与实际曲线在主要峰值和谷值位置能够较好的吻合。

分别以图 9 中四个位置为中心脉冲利用 RD 算法成像,其中位置 2 即本文算法估计的最优成像时间中心脉冲,其对应的成像积累脉冲数为 1 110 个。图 10(a~d)的中心脉冲分别对应了图 9 中 1~4 位置,为了方便比较成像结果,将积累脉冲数统一设为 1 110 个。可以看出图 10(a, c)的方位向分辨率较低;如图 10(d)标记所示,图中标记部分发生了严重的方位向散焦,散焦原因与仿真情况相同;图 10(b)的方位向分辨率最高且没有发生明显的方位向模糊。以上结果证明在视角 β 接近 $\frac{\pi}{2}$ 的

成像积累脉冲数为 560 个。图 8(a~d)的中心脉冲分别对应了图 7(a)中 1~4 位置,为了方便比较成像结果,统一将积累脉冲数设为 560 个。从图 8(a, c)可以看出目标方位向分辨率较低且方位向散焦现象较明显;如图 8(d)所示,目标图像出现了严重的方位向散焦,这是因为该数据段对应的子孔径跨越了舰船纵摇的两个相反方向;而图 8(b)的方位向分辨率最高且没有发生明显的方位向模糊。

3.2 货船目标实测数据实验

本节将利用 ISAR 实测数据对算法做出验证和分析。实测数据是由岸基 X 波段宽带脉冲雷达对海上滚装货船目标探测得到的回波。当时海况为 2~3 级海情,雷达带宽为 170 MHz, PRF 为 625 Hz。合成孔径时间内雷达相对舰船目标的视角 β 接近 $\frac{\pi}{2}$, 因此大多数时间内可以得到目标的侧视图。实测数据共 10 800 个脉冲,首先对距离向压缩完毕的回波数据分块,分别计算每个分块的多

情况下,本文提出的最优成像时间选择算法可以筛选出适合 RD 成像的理想数据段。

图 11 是采用本算法筛选出的其他最优成像时间段的成像结果。与图 10(a, c, d)的结果相比,图 11 的方位向分辨率更高且聚焦效果更好。

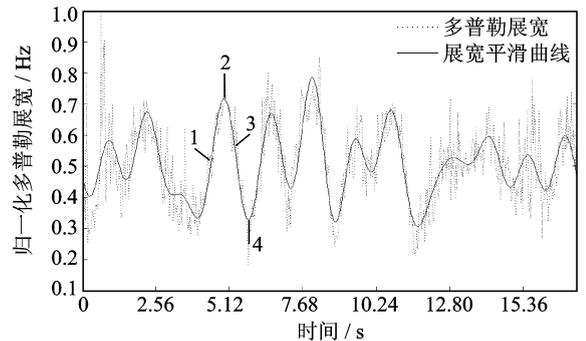


Fig. 9 Doppler spread of echo signal from the cargo ship target

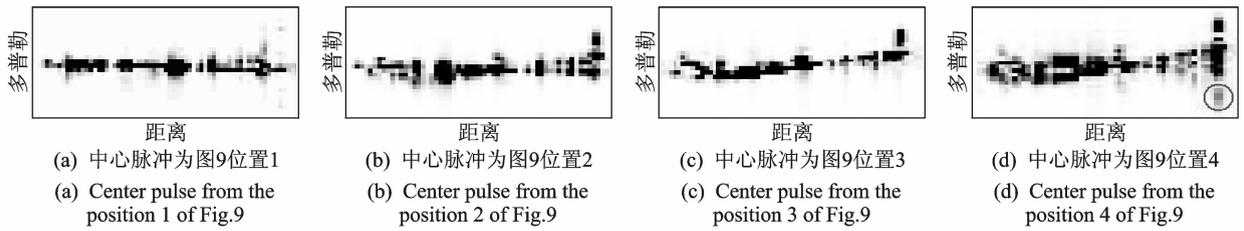


图10 实测货船目标成像结果

Fig.10 Imaging results of the cargo ship target

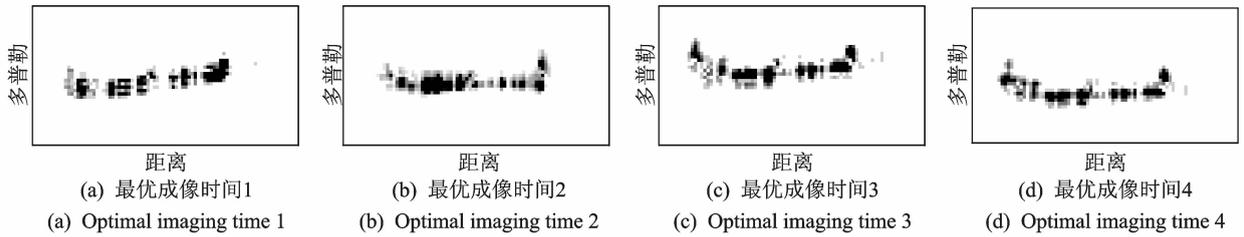


图11 实测数据其他最优成像时间段成像结果

Fig.11 Imaging results of the others optimal imaging time

4 结束语

本文提出了一种基于平均多普勒展宽的最优成像时间选择算法。该算法利用目标距离向先验信息,隔离了部分微多普勒效应的干扰,并将该先验信息作为低通滤波设定通频带的重要依据,提高了多普勒展宽曲线平滑的准确性,算法整个过程无需人工干预。平均多普勒展宽的估计结合了方差的概念,获得了较好的估计准确性和鲁棒性。仿真和实测数据的处理结果表明,利用本文算法筛选出的数据段成像可以使目标图像在方位向分辨率和图像质量之间获得合理的折中。

参考文献:

- [1] Wang Yong. New method of time-frequency representation for ISAR imaging of ship targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(4): 502-511.
- [2] Wang Ran. ISAR imaging of ship based on the modified 4th order time-frequency distributions with complex-lag argument[C]// Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE). Nanjing:[s. n.], 2012:1-4.
- [3] Li Gang, Wang Xiqin, Xia Xianggen. ISAR imaging using parametric L0-norm minimization[C]// Radar Conference. Atlanta, GA:[s. n.], 2012: 0421-0424.
- [4] Zhu Daiyin, Li Yong, Yu Xiang, et al. Compressed

- ISAR autofocusing: Experimental results[C]// Radar Conference. Atlanta, GA:[s. n.], 2012:0425-0430.
- [5] Xiao Da, Su Fulin, Wu Jiawei. Multi-target ISAR imaging based on image segmentation and short-time Fourier Transform[C]// Image and Signal Processing 5th International Congress. Chongqing:[s. n.], 2012:1832-1836.
- [6] Li Gang, Zhang Hao, Wang Xiqin, et al. ISAR 2-D imaging of uniformly rotating targets via matching pursuit[J]. IEEE Trans on AES, 2012, 48(2):1838-1846.
- [7] Rao Wei, Li Gang, Wang Xiqin, et al. Adaptive sparse recovery by parametric weighted L minimization for ISAR imaging of uniformly rotating targets [J]. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(2):942-952.
- [8] Li Yachao, Xing Mengdao, Su Junhai, et al. A new algorithm of ISAR imaging for maneuvering targets with low SNR[J]. IEEE Trans on AES, 2013, 49(1): 543-557.
- [9] Martorella M, Berizzi F. Time windowing for highly focused ISAR image Reconstruction[J]. IEEE Trans on AES, 2005, 41(3):992-1007.
- [10] Nicola Battisti, Marco Martorella. Time frame selection for high PRF pulsed Doppler radar ISAR image formation[C]// Proceedings of the 6th European Radar Conference. Rome:[s. n.], 2009:274-277.
- [11] Abdul Gaffar M Y, Nel W A J. Selecting suitable co-

- herent processing time window lengths for ground-based ISAR imaging of cooperative sea vessels[J]. IEEE Trans on GRS, 2009, 47(9):3231-3240.
- [12] Pastina D, Spina C. Slope-based frame selection and scaling technique for ship ISAR imaging[J]. IET Signal Process, 2008, 2(3): 265-276.
- [13] Zhang Long, He Xiaohui. Optimum time interval selection of ISAR imaging of ship target[C]// Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). New York:[s. n.], 2011: 23-25.
- [14] Zhang Yingkang, Hu Shaohai. A new method of motion estimation and imaging interval selection of ISAR system based on geometry invariance of rigid target[C]// Signal Processing (ICSP) International Conference. Beijing:[s. n.], 2010:1955-1958.
- [15] Rihaczek A W, Hershkowitz S J. Choosing imaging intervals for small ships[C]//Proc SPIE, Radar processing, Technology and Application. Germany:[s. n.], 1999: 139-148.
- [16] Rapsilber D. Air borne ISAR processing for ship target imaging [C] // EUSAR-European Conference. London:[s. n.],1996:435-438.
- [17] Pastina D, Montanari A, Aprile A. Motion estimation and optimum time selection for ship ISAR imaging[C]// IEEE Radar Conference. Paris:[s. n.], 2003: 7-14.
- [18] Hajduch G, Caillec J M L E, Garelo R. Airborne high-resolution ISAR imaging of ship targets at sea [J]. IEEE Trans on AES, 2004, 40(1):378-384.
- [19] Sun Haiping, Xing Mengdao, Zhou Lijuan. Division of imaging intervals and selection of optimum imaging time for ship ISAR imaging based on measured data[C]//Radar International Conference. Shanghai: [s. n.], 2006:1-4.
- [20] Zhang Yabiao, Yan Shiqiang. Research on high-resolution ship targets radar imaging at sea[C]// Synthetic Aperture Radar A Asian and Pacific Conference. Huangshan:[s. n.], 2007:536-540.
- [21] 尹松乔, 姜义成. 基于成像时间段的高海情舰船 ISAR 成像方法[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(4): 323-328.
- Yin Songqiao, Jiang Yicheng. Ship ISAR imaging method in high sea condition based on optimal imaging time selection[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(4):323-328.
- [22] 徐伟. 舰船 ISAR 成像的时间段优化选取[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(5):62-66.
- Xu Wei. Time segment optimization selection of inverse synthetic aperture radar imaging of ship[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010, 33(5): 62-66.
- [23] Wang Ling, Ye Xu, Zhu Daiyin, et al. Novel side-view imaging of ships at sea for airborne ISAR[C]// Radar Conference. Washington, DC:[s. n.], 2010: 767-772.
- [24] 汪玲. 逆合成孔径雷达成像关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [25] 苏永康, 吴如松. 浅谈大风浪中的船舶操纵[C]// 航海技术论文选集(第 1 集). [S. l.]: 中国航海学会, 2010:10-19.

作者简介:朱岱寅(1974-),男,教授,研究方向:雷达成像和信号处理,E-mail:zhudy@nuaa.edu.cn;俞翔(1982-),男,博士研究生,研究方向:逆合成孔径雷达成像技术,E-mail:cwal20@163.com;汪玲(1977-),女,副教授,研究方向:雷达信号检测与处理。