

基于图像对比度的舰船目标成像算法

吴东 郝明

(南京电子技术研究所 南京 210000)

摘要: 针对舰船目标 ISAR 成像时舰船随机摆动对于成像质量的影响,提出了一种同时基于多普勒中心估计和图像对比度准则的最优成像时间段选择方法。该方法根据海舰船回波的实际数据,估计各个回波的多普勒中心频率,并根据多普勒中心曲线选取舰船目标的线性成像段。然后,通过采用图像对比度准则,对该线性段进行处理。相比已有的方法,本文的成像效果更好。该方法易于实现且运算量较低,适用于实时应用。仿真数据的处理结果验证了本文所提方法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达;舰船目标;最优成像时间;多普勒中心;图像对比度

中图分类号: TN959.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

New ISAR imaging interval selection method for ship targets on sea based on imaging contrast

Wu Dong Hao Ming

(Nanjing Institute of Electronic Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: To solve the problem of imaging ambiguity when there is random sway of ship target in inverse synthetic aperture radar (ISAR) application, a method for selecting optimal imaging time based on estimation of the Doppler centroid frequencies (DCF) and image contrast is proposed. This method calculates Doppler center from real echoes of ship target, then chooses optimal imaging time according to the change of Doppler center. After that, a definition of image contrast is given to help dealing with selecting optimal imaging time. In comparison with existing methods, the proposed one can select better period for ISAR imaging which leads to an imaging result with higher quality. The method is easy to implement and computational complexity is lower, which is suitable for real-time applications. The effectiveness of the proposed method is verified by the simulation data processing result.

Keywords: inverse synthetic aperture radar (ISAR); ship target; optimal imaging time; Doppler center; image contrast

0 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)能够对非合作目标成像,得到目标的二维高分辨率图像,是一种有效的雷达目标识别途径^[1-3]。与飞机、地面车辆等运动目标的成像相比,舰船成像的特点是海浪起伏引起舰船偏航、纵摇、横摇可以作为成像的主要来源^[4]。由于舰船的三维摇摆运动,目标的有效转动矢量的大小和方向具有时变特性,获得高质量的图像具有极大难度。

针对海舰船目标的成像问题,国内外学者已经提出了一些成像处理方法,如时频分析法^[5-8]、最优成像时间选择法^[9-13]。时频分析法^[5]不受多普勒频率时变的影响,可以得到一系列的反映舰船姿态变化的瞬时图像,但是计算量庞大,对计算机的存储要求较高,存在大量的信息冗余。最

优成像时间选择法通过从回波数据中提取舰船的运动信息,并根据该信息,选择等效转动角速度较大且平稳的数据段进行成像。

最优成像时间选择是近年来国内外研究机构研究舰船成像的主要方向。已有的经典算法主要分为两类:基于图像图形分析的筛选算法和基于估计目标散射点多普勒信息的筛选方法。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目标特征估计目标的运动特性。如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时间段^[9],该算法计算量较大且图像预处理部分需要人工干预设定阈值。如一种基于图像对比度的筛选方法^[10-11],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,该算法计算量大,难以用于

工程实践。第二类经典算法通过计算目标散射点的多普勒展宽^[12-13]或者多普勒中心估计目标的运动特性^[14,15],计算量较小,但是图像质量相比第一类算法较差。

本文在对文献[11]和[15]进行深入研究的基础上,通过研究海面舰船目标的运动特点,提出了一种新的基于多普勒中心估计和图像对比度的算法。算法根据舰船运动特征提取出舰船多普勒中心的变化曲线,对该曲线自动、快速地筛选出最优成像数据段,并采用图像对比度进行二次筛选,该算法筛选出的数据段成像,图像质量更好,计算量适中,适合实时运用。本文通过仿真数据的处理,验证了该方法的有效性。

1 海上舰船目标运动模型

利用战斗机对舰船进行成像时,载机和目标都有较大的运动,此时既具有 SAR 的成分(载机运动),又有 ISAR 的成分(舰船的摇摆运动),其运动相当复杂,加大了数据处理的难度。SAR-ISAR 混合对舰船进行成像的主要困难在于舰船目标的运动是非合作性的,会对雷达平台的运动补偿产生严重影响。下面分析舰船成像的特点。

载机飞行带来的舰船相对于 RLOS(雷达视线)的转动。其坐标如图 1 所示。

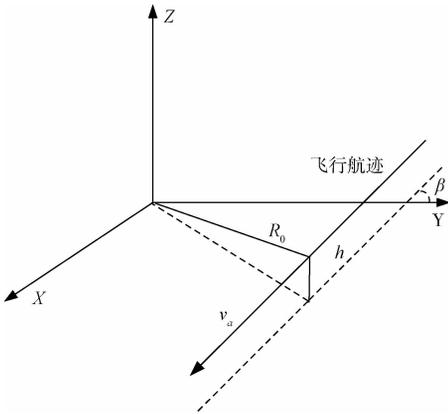


图 1 载机坐标

R_0 为初始时刻雷达与目标的距离, v_a 为载机的飞行速度。则在坐标系 (X, Y, Z) 中载机的瞬时位置向量 \mathbf{R} 为:

$$\begin{aligned} R_x &= v_a t \sin\beta + \sqrt{R_0^2 - h^2} \cos\beta \\ R_y &= -v_a t \cos\beta + \sqrt{R_0^2 - h^2} \sin\beta \\ R_z &= h \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ -\cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} v_a t \\ \sqrt{R_0^2 - h^2} \\ h \end{vmatrix} \quad (2)$$

设 RLOS 方向的单位矢量为 \mathbf{r}_{los} 。飞机的速度矢量 \mathbf{V} 为:

$$\mathbf{V} = \begin{vmatrix} \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ -\cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} v_a \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

则载机产生的相对目标的有效角速度矢量为:

$$\boldsymbol{\omega}_s = \frac{\mathbf{V} \times \mathbf{r}_{\text{los}}}{|\mathbf{R}|} \quad (4)$$

由式(4)可以得到,载机飞行带来的相对于 RLOS 视角方向的等效转动角速度大小近似为 $\frac{v_a}{R}$, 方向垂直于 RLOS 和载机飞行轨迹所在的平面。下面将载机和舰船结合在一起进行分析。

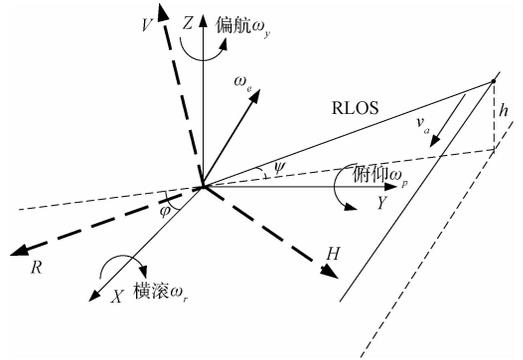


图 2 机载对舰船成像几何示意图

舰船偏航、横滚、俯仰随时间的变化可以用一个正弦函数来描述:

$$\alpha = q \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi\right) \quad (5)$$

式中: q 是转动的幅度, T 为转动周期, φ 为初始相位。舰船的转动角速度为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_r = \frac{2\pi q_r}{T_r} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_r} + \varphi_r\right) \\ \boldsymbol{\omega}_p = \frac{2\pi q_p}{T_p} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_p} + \varphi_p\right) \\ \boldsymbol{\omega}_y = \frac{2\pi q_y}{T_y} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_y} + \varphi_y\right) \end{cases} \quad (6)$$

图 2 中 $\boldsymbol{\omega}_e$ 是舰船自身三维转动矢量 $\boldsymbol{\omega}_r, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_p$ 与载机飞行转动矢量 $\boldsymbol{\omega}_s$ 的合成矢量。 (R, H, V) 是从雷达视角建立的坐标系,其中 R 轴始终沿着 RLOS 方向, H 轴与 R 轴垂直,位于 (X, Y) 平面内, V 轴方向垂直于 (R, H) 平面, (R, H, V) 坐标系原点位于舰船中心,与坐标系 (X, Y, Z) 的原点重合。图像的投影平面垂直于 $\boldsymbol{\omega}_e$ 和 RLOS 方向确定的平面。将 $\boldsymbol{\omega}_e$ 分解到 H 轴和 V 轴,并分别用 $\boldsymbol{\omega}_h, \boldsymbol{\omega}_v$ 表示。则利用 $\boldsymbol{\omega}_h$ 可以得到舰船的侧视图,而利用 $\boldsymbol{\omega}_v$ 可以得到舰船的俯视图,因此 $\boldsymbol{\omega}_h, \boldsymbol{\omega}_v$ 通常也被称为水平转动矢量和垂直转动矢量。它们的相对大小决定了有效转动矢量 $\boldsymbol{\omega}_e$ 的方向。 ψ 为雷达与目标之间的擦地角, φ 为任意时刻雷达视线方向与 X 轴的夹角。

$\omega_h, \omega_v, \omega_e$ 与舰船的三维转动矢量 $\omega_r, \omega_y, \omega_p$, 以及载机飞行转动矢量 ω_s 的关系:

$$\begin{aligned} \omega_h &= \omega_r \sin\varphi + \omega_p \cos\varphi \\ \omega_v &= (\omega_r \cos\varphi - \omega_p \sin\varphi) \sin\psi + \omega_s + \omega_y \cos\psi \\ \omega_e &= \sqrt{\omega_h^2 + \omega_v^2}, \gamma = \arctan \frac{\omega_h}{\omega_v} \end{aligned} \quad (7)$$

γ 为 ω_e 与 V 轴的夹角。

由式(7)可以看出,舰船的水平转动分量主要取决于舰船的横滚和俯仰,而由于载机与舰船的距离很大,因此 ψ 很小,所以垂直分量主要取决于舰船的偏航和载机飞行引起的转动角速度。当海情较高时,舰船自身的摇摆较剧烈。三维转动中,舰船横滚最强,偏航和俯仰较弱,载机飞行转动矢量 ω_s 在远距离成像时更小,因此舰船摇摆主要是横滚和俯仰,是成像的主要来源。在海情较低时,舰船的摇摆变弱,载机飞行成为舰船成像的主要来源。

假设舰船上某散射点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 该散射点的方位向回波信号可为:

$$S(t) = a \left(\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c} \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_i(t_m) \right) \quad (8)$$

$R_i(t_m)$ 为该散射点与雷达之间的距离, $a(t)$ 为回波信号在方位向的幅度调制函数。通常舰船被视为刚体目标,它与雷达之间的相对运动被分解为舰船上某一参考点沿 RLOS (雷达视线) 方向的平动和舰船自身(所以其它散射点)绕该参考点的转动。

$$R_i(t_m) = R_{ai}(t_m) + r_i(t_m) \quad (9)$$

其中 $R_{ai}(t_m)$ 为雷达载机与舰船的中心之间的距离,由于载机运动和舰船航行,该值是不断变化的,它代表了雷达与舰船之间的平动分量。 $r_i(t_m)$ 为舰船上散射点在 (R, H, V) 坐标系中 R 轴上的坐标,由于舰船的摇摆,该坐标是随时间变化的。它实际代表了舰船转动带来的船上散射点与雷达之间的距离的变化。 $r_i(t_m)$ 可以通过舰船的三维转动矩阵 $\mathbf{Rot}(\theta'_r, \theta_h, \theta_v)$ 求得。

$$\begin{bmatrix} r_i(t_m) \\ h_i(t_m) \\ v_i(t_m) \end{bmatrix} = \mathbf{Rot}(\theta'_r, \theta_h, \theta_v) = \mathbf{Rot}(\theta'_r) \mathbf{Rot}(\theta_h) \mathbf{Rot}(\theta_v) \begin{bmatrix} r_{i0} \\ h_{i0} \\ v_{i0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{Rot}(\theta'_r) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta'_r & -\sin\theta'_r \\ 0 & \sin\theta'_r & \cos\theta'_r \end{bmatrix}, \\ \mathbf{Rot}(\theta_h) &= \begin{bmatrix} \cos\theta_h & 0 & \sin\theta_h \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_h & 0 & \cos\theta_h \end{bmatrix}, \\ \mathbf{Rot}(\theta_v) &= \begin{bmatrix} \cos\theta_v & -\sin\theta_v & 0 \\ \sin\theta_v & \cos\theta_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$\theta'_r, \theta_h, \theta_v$ 分别为散射点绕 (R, H, V) 坐标轴转过的角度。 (r_{i0}, h_{i0}, v_{i0}) 为 t_0 时刻该散射点在 (R, H, V) 坐标系中的坐标,设 t_0 时刻该散射点在 (X, Y, Z) 坐标系中的坐标 (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) 。

$$\begin{bmatrix} r_{i0} \\ h_{i0} \\ v_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\varphi_0 & -\cos\psi \sin\varphi_0 & -\sin\psi \\ \sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ \cos\varphi_0 \sin\psi & -\sin\varphi_0 \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{i0} \\ y_{i0} \\ z_{i0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

φ_0 为 t_0 时刻雷达视线方向与 X 轴之间的夹角, $\varphi_0 = \varphi + \theta_y$ 。由于载机与舰船距离较远,因此可以认为 $\psi \approx 0$, 则有

$$\begin{bmatrix} r_{i0} \\ h_{i0} \\ v_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & -\sin\varphi_0 & 0 \\ \sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{i0} \\ y_{i0} \\ z_{i0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于雷达载机的运动,这里除了要考虑舰船三维转动,还要考虑载机与舰船的相对切向运动引起的等效转动。该转动引起的是视角 φ 的变化,与偏航等效,因此,如式(14)所示:

$$\begin{aligned} \theta'_r &= \theta_r \cos\varphi - \theta_p \sin\varphi \\ \theta_h &= \theta_r \sin\varphi + \theta_p \cos\varphi \\ \theta_v &= \theta_y + \Delta\varphi \end{aligned} \quad (14)$$

将式(11)代入式(10),如式(15)所示:

$$r_i(t_m) = r_{i0} \cos\theta_h \cos\theta_v - h_{i0} \cos\theta_h \sin\theta_v + v_{i0} \sin\theta_h \quad (15)$$

假设在成像期间, θ_h, θ_v 的变化足够小,式(15)可近似写为:

$$r_i(t_m) \approx r_{i0} - h_{i0} \theta_v + v_{i0} \theta_h \quad (16)$$

可以得到回波的相位为:

$$\varphi(t_m) = -\frac{4\pi}{\lambda} [R_o(0) + \dot{R}_o(0)t_m + 1/2\ddot{R}_o(0)t_m^2 + r_{i0} - h_{i0}\theta_v + v_{i0}\theta_h] \quad (17)$$

对式(17)求导,可得散射点的多普勒频率:

$$\begin{aligned} f_d(t_m) &= -\frac{2}{\lambda} \dot{R}_o(0) - \frac{2\ddot{R}_o(0)t_m}{\lambda} - \frac{2}{\lambda} h_{i0} \dot{\omega}_v + \frac{2}{\lambda} v_{i0} \dot{\omega}_h = \\ &= -\frac{2}{\lambda} \dot{R}_o(0) - \frac{2\ddot{R}_o(0)t_m}{\lambda} - \frac{2}{\lambda} h_{i0} \omega_e \cos\gamma + \frac{2}{\lambda} v_{i0} \omega_e \sin\gamma \end{aligned} \quad (18)$$

前两项是雷达和舰船中心参考点之间的平动给所有散射点带来的相同的多普勒频率,可以通过 keystone 方法消除距离徙动和距离弯曲项。

现在假设式(18)的前两项已经去除,可以写为:

$$f_d(t) = -\frac{2}{\lambda} h_{i0} \omega_e \cos\gamma + \frac{2}{\lambda} v_{i0} \omega_e \sin\gamma \quad (19)$$

其中 ω_e 为有效转动矢量, γ 为 ω_e 与 V 轴的夹角。它与散射点的坐标有关,这正是成像的来源。由式(19)可知, $f_d(t)$ 随时间变化,且呈非线性变化,若直接进行 RD 成像,则各个散射点将出现模糊,无法获得好的图像。因此,需要对成像时间段进行筛选,筛选出 $f_d(t)$ 随时间变化,多普勒展宽程度最大,且线性段最好的时间段进行成像,以得到清晰的 ISAR 图像。

2 最优成像时间段筛选

舰船目标可以假设为刚体,其各个散射点是做整体性

的运动,运动形式基本是相同的,故而,多普勒中心频率也可以近似认为与单个散射点的多普勒频率的变化情况相似。因为舰船是振幅变化的随机周期性函数,其多普勒频率在慢时间域为调幅-调频信号,转动速度较快及其幅度大的时候,近似为一线性调频信号。

对筛选出的时间段采用 RD 成像,就要求 $f_d(t)$ 筛选出的成像时间段内呈线性变化,且拥有大的带宽,在采用 RD 成像算法的时候,才能获得最优的成像质量。

目标回波的多普勒中心估计可以采用 SAR 成像中的多普勒中心估计方法,根据舰船的运动特点可知,舰船的多普勒中心的函数,随时间变化呈现随机周期的周期性函数。在实际应用中,需要确定多普勒中心的峰值点,并通过计算相邻峰值点之间的带宽,选择带宽变化较大的部分,也即多普勒中心频率变化最大的那部分进行成像。

对舰船最优成像时间进行筛选之后,需要采用 RD 算法进行成像,因此决定舰船成像质量的因素主要有两个:1)成像时间段内的成像积累时间,积累时间越长,则分辨率越高;2)成像时间段内的线性程度,在 RD 成像算法中, f_d 线性程度越好,则该算法的成像效果越好。

对多普勒中心估计之后筛选出的成像时间段进行分析,根据已有的算法^[10-11],该段时间内,多普勒中心频率具有最大的多普勒展宽,但是其线性程度并没有进行评估,尤其是成像时间段两端的起始点和结束点。由多普勒中心估计筛选出的成像段,具有良好的线性程度,若是在起始点和结束点两端延长一小段成像时间,牺牲一部分线性程度的代价,以获得更长的积累时间,能够获得更好的图像质量。综合考虑成像时间段的带宽和线性程度,在两者之间获得一个折中,能获得最优的成像质量。

为了知道扩展起始点和结束点附近多少成像时间,可以很好地平衡线性程度和带宽,从而获得最优的成像时间段,本文引入了图像对比度的概念,利用图像对比度对成像时间段进行二次筛选。

图像对比度的定义如下:

$$S_k(a,b) = \frac{\sqrt{E\{[I(m,n,a,b) - E(I(m,n,a,b))]^2\}}}{E[I(m,n,a,b)]} \quad (20)$$

其中, $I(m,n,a,b)$ 是图像的函数,含有 m 个多普勒单元和 n 个距离单元, a 为成像起始时刻, b 为成像积累时间。 E 是取均值的算子, S_k 是图像对比度。

在散射点模型中,图像对比度越大,意味着第 i 个散射点处的幅度值,将远大于图像均值,此时的图像质量较高,聚焦程度较好。当图像对比度较小时,意味着第 i 个散射点处的幅度值,与图像均值较为接近,此时图像模糊,成像质量较差。因此,图像对比度的评价函数,能够用来评价成像质量的好坏。

用图像对比度的函数,来对成像时间段进行二次筛选,算法流程如图 3 所示。

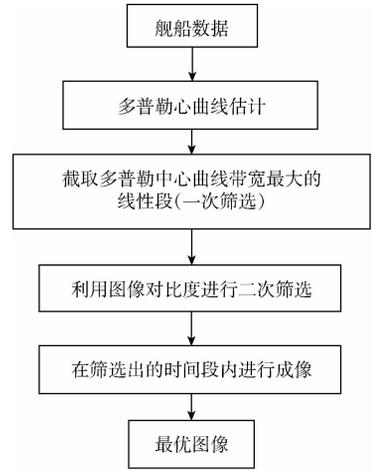


图 3 总流程

利用图像对比度的二次筛选算法流程如图 4 所示,增加了原先的成像时间段长度,牺牲了一部分线性程度,以获得更多的成像积累时间,采用图像对比度的参数,搜索到了最优成像时间段。



图 4 利用图像对比度的二次筛选算法流程

3 仿真数据处理结果分析

下面进行舰船目标成像仿真数据处理, 载机 1 平台参数如表 1 所示, 舰船 1 运动参数如表 2 所示。

表 1 SAR 系统参数

载频	9.6 GHz
距离带宽	200 MHz
距离采样率	240 MHz
方位积累时间	2 s
方位角度	45°
PRF	2 kHz
高度	15 km
斜距	35 km
载机速度	150 m/s
斜视角	40°

表 2 舰船运动参数

尺寸(长宽高)	88 m
横滚幅度	10°
偏航幅度	1.9°
俯仰幅度	1.7°
航速	10 m/s
横滚周期	10.7 s
偏航周期	10.2 s
俯仰周期	6.7 s

多普勒中心频率曲线如图 5 所示,从图中可以看出,多普勒中心曲线在某些时间段内,可以近似地认为具有线性调频的特性,可以通过计算各个极点之间的多普勒频率之差,寻找多普勒展宽最大的时间段,作为一次筛选的结果。

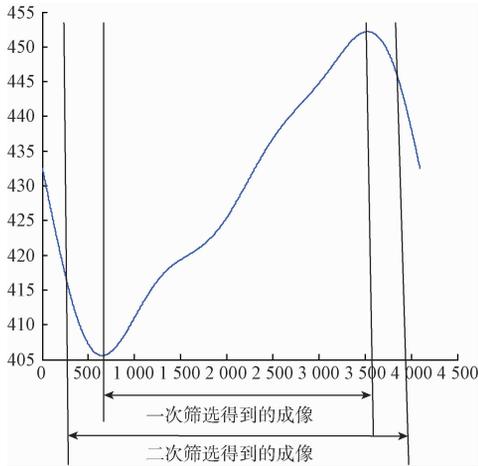


图 5 多普勒中心频率曲线

图 6 为图像对比度随成像时间段的变化,横坐标是扩展长度的数值 i , 比如,横坐标为 100 时,成像时间段为 $(a_{start} - 100, b_{end} + 100)$, 此时的图像对比度为 1.178 9。根据图像对比度变化曲线及其拟合变化曲线,当 i 为 329 时,图像对比度取到一个极大值,为 1.182 7。根据拟合曲线,当 i 大于 329 时,图像对比度的数值没有继续增长,线性程度变差,图像质量变差。

图 7 为一次筛选出的时间段进行成像得到的舰船图像,图 8 为二次筛选出的最优成像时间段进行成像。图 8 对应二次筛选的成像时间段,具有更长的积累时间,线性程度相比一次筛选出的时间段较差,在积累时间和线性程度之间获得了一个折中,取得了最大的图像对比度,此时成像质量最好。对比两幅图像,图 8 中,圆圈内的图像更加清晰,将原来大亮斑变成细节更加丰富的亮点,提供了更多细节,获得了最佳的图像质量。

载机 2 平台参数如表 1 所示,舰船 2 运动参数如表 3 所示。

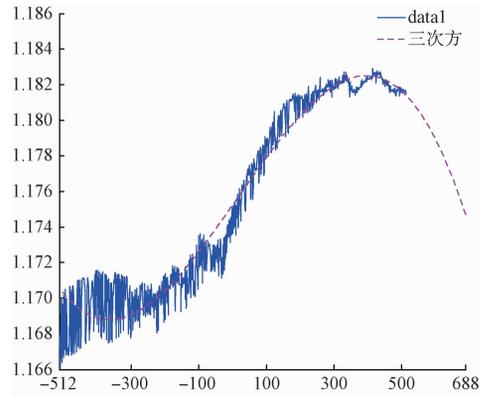


图 6 图像对比度变化曲线

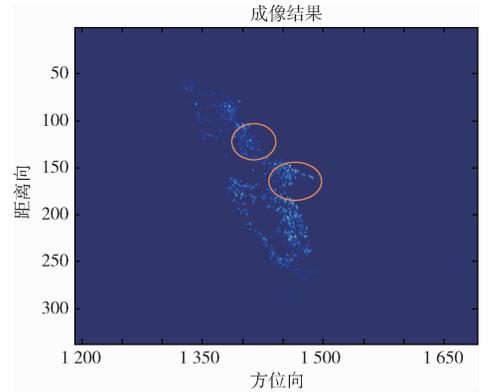


图 7 非最优成像

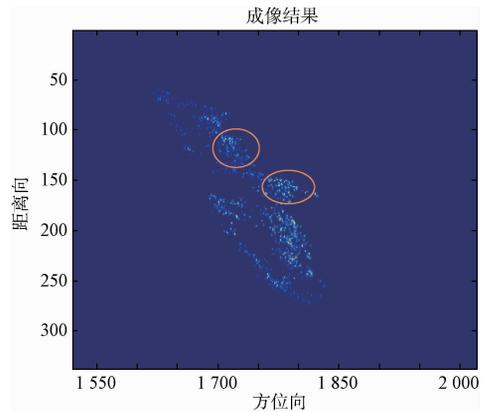


图 8 最优成像

表 3 舰船运动参数

尺寸(长宽高)	33 m
横滚幅度	10°
偏航幅度	1.9°
俯仰幅度	1.7°
航速	10 m/s
横滚周期	10.7 s
偏航周期	10.2 s
俯仰周期	6.7 s

第2艘舰船的尺寸比第1艘舰船较小,成像难度更大,采用本文的方法,能够更好地提高图像质量。

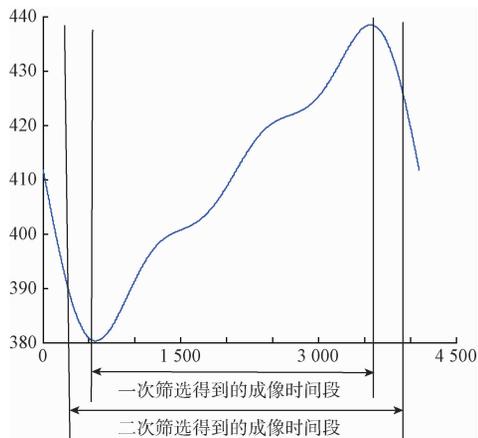


图9 多普勒中心频率曲线

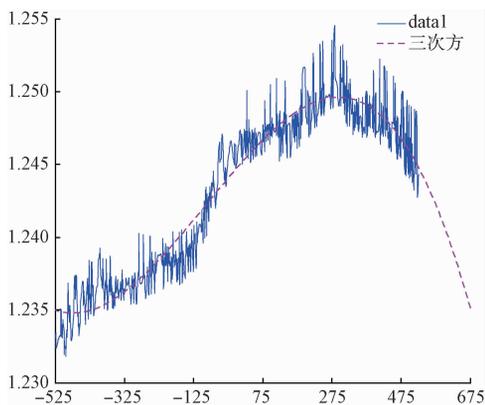


图10 图像对比度变化曲线

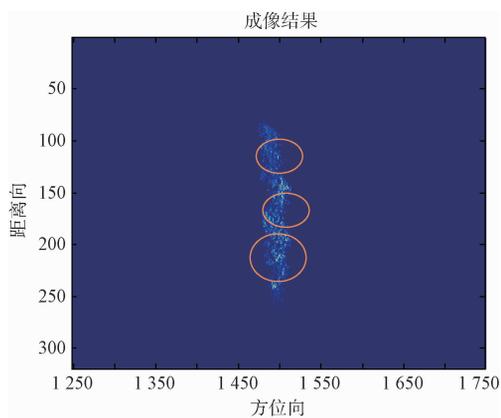


图11 非最优成像

图12为扩展长度为283时所成的图像,对应的图像对比度为1.2545,对应图10中的峰值点。对比两幅图像,图12中,圆圈内的图像更加清晰,将原来大亮斑变成细节更加丰富的亮点,提供了更多细节,获得了更佳的质量。

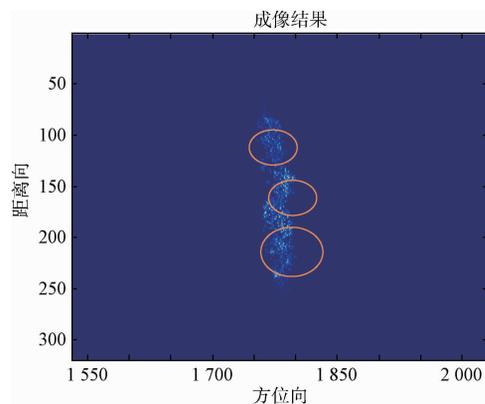


图12 最优成像

4 结 论

本文研究了 ISAR 舰船成像最优成像时间段的选择问题,对现有的算法进行了总结和归纳,在其基础上提出了根据多普勒中心曲线截取最优成像时间段,并采用图像对比度进行二次筛选的方法。根据多普勒中心曲线截取线性段,能够以较小的计算量,筛选出最优成像段,以图像对比度准则作为评价 ISAR 图像聚焦程度的标准,对该最优成像段进行二次筛选,能获得比之前成像质量更好的图像,仿真数据也验证了这个方法,采用本文方法筛选出的数据段进行成像,舰船图像呈现出了更多细节,在综合考虑计算量和成像质量的基础上,获得了最优成像时间段的选择。

参考文献

- [1] 冯智鑫,彭业飞. SAR 技术及相关算法研究综述[J]. 电脑知识与技术,2016,12(10):242-243.
- [2] 刘百玲,江海清,倪书爱. 基于 GPU 的 ISAR 成像算法实现[J]. 电子测量技术,2015,38(8): 76-78.
- [3] 卢志忠,杨江洪,黄玉,等. 航海雷达图像阴影提取波高算法的改进研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(1): 212-218.
- [4] 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,2017,44(2): 28-34.
- [5] 俞一鸣. 时频分析简介及应用[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6):12-15.
- [6] 句彦伟,于立,王洋. 基于时频分析的 ISAR 瞬时成像算法[J]. 现代雷达,2009, 31(7): 46-49.
- [7] LI Y, LIU K SH, TAO R. Adaptive viterbi-based range-instantaneous Doppler algorithm for ISAR imaging of ship target at sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015,40(2): 417-425.
- [8] 张利军,张民,刘勍,等. 基于混和时频分析方法的 ISAR 成像研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,

- 29(4): 563-568.
- [9] BATTISTI N, MARTORELLA M. Time frame selection for high PRF pulsed Doppler radar ISAR image formation[C]. Proceeding of the 6th European Radar Conference. Rome, 2009:274-277.
- [10] 陈杰,肖怀铁,范红旗,等. 基于图像对比度最优的频率步进 ISAR 成像方法[J]. 国防科技大学学报,2014, 36(1): 93-98.
- [11] 王冉,姜义成. ISAR 舰船目标成像时间段选取[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011, 43(7): 57-60.
- [12] LV X L, XING M D, WAN CH R. ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(1): 141-153.
- [13] 朱岱寅,俞翔,汪玲. 海面舰船目标 ISAR 最优成像时间选择算法[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 526-532.
- [14] NOVIELLO C, FORNARO G, BRACA P. ISAR motion compensation based on a new Doppler parameters estimation procedure [C]. 2015 IEEE International Conference of Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE, 2015: 2445-2448.
- [15] 尹松乔,姜义成. 基于成像时间段的高海清舰船 ISAR 成像方法[J]. 雷达科学与技术,2010, 8(4): 323-328.

作者简介

吴东,1992 年出生,在读硕士研究生,研究方向为雷达成像与雷达信号处理。

E-mail:wudongcarl@163.com