

一种基于参数估计的运动舰船 SAR 成像方法^{*}

杨传安^{1,2} 齐向阳¹ 李 宁¹

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100190)

摘 要:海面舰船不仅存在自身动力带来的平移运动,还受风浪等影响存在摇摆运动和振荡运动等复杂运动形式,传统 SAR 成像算法难以获得聚焦舰船图像,首先建立了海面振荡舰船和摇摆舰船的 SAR 成像几何模型,在此基础上推导并分析了回波信号特点,针对回波特点提出了基于附加多普勒参数估计与补偿的舰船成像方法,使用平滑伪魏格纳分布 (SPWV) 提取并估计附加多普勒参数,能够明显改善振荡舰船和摇摆舰船 SAR 成像的聚焦效果,最后通过仿真实验证明了该方法的有效性。

关键词:合成孔径雷达;舰船成像;参数估计

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

A method for moving ship SAR imaging based on parameter estimation

Yang Chuan'an^{1,2} Qi Xiangyang¹ Li Ning¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: It is difficult to obtain the focused image by the conventional SAR imaging algorithm for ship with complicated motions like oscillating and swing. The SAR imaging model and echo characteristics of oscillating ship and swing ship are separately studied in this paper. Furtherly, a set of moving ship SAR imaging processes are proposed to improve the quality of image. This method can extract and estimate the additional Doppler parameters by smoothing pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD), which can obtain the focused SAR image of oscillating ship and sway ship. Finally, the effectiveness of the method is proved by simulation experiment.

Keywords: synthetic aperture radar; ship imaging; parameter estimation

1 引 言

海面舰船聚焦成像在海防预警、渔业管理和航运管制等方面具有重要的意义和价值^[1]。海面舰船的运动形式十分复杂,不仅存在直线运动,还因风浪等影响存在三维摇摆(横摇、纵摇、偏航)运动和三维振荡(横荡、纵荡、垂荡)运动等复杂非线性运动^[2-3]。传统 SAR 成像方法难以获得振荡舰船及摇摆舰船的聚焦图像,舰船在 SAR 图像中会出现散焦或“鬼影”现象,对后续舰船的检测、识别及其他应用造成了严重的影响^[4-5]。因此研究振荡运动和摇摆运动舰船的成像是十分必要的。

当前对运动舰船成像的研究主要是针对直线匀速运动,对于振荡运动舰船以及摇摆运动舰船成像的研究却较

少,且大都基于 ISAR 技术。文献[6]提出了基于回波多普勒参数估计的直线运动舰船成像流程,汪玲等人研究了基于最优成像时间选取的 ISAR 舰船成像方法,估计并选取舰船平稳运动时间段进行成像,其缺点是成像积累时间变短,分辨率降低^[7-8]。雷杰等人使用钟摆模型近似舰船的偏航运动,研究了 ISAR 回波特点和成像算法^[3];杨秋,张群等人^[9-11]研究了摇摆运动舰船的 SAR 回波及其多普勒特性;周辉等人^[12-13]研究了单散射点的一维振动和三维转动的 SAR 回波模型。

建立了海面振荡舰船和摇摆运动舰船的 SAR 成像几何模型,并在模型的基础上分析了回波特点,针对回波特点,提出了一套基于附加多普勒参数估计与相位补偿的成像流程,该流程用包络最小熵方法校正舰船振荡或摇摆引

收稿日期:2017-02

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年基金(61601437)资助项目

起的距离误差,用 SPWV 时频变换方法提取时变附加多普勒参数,综合附加多普勒参数对相位误差进行补偿而获得振荡及摇摆舰船聚焦图像,并通过仿真实验证明了该方法可以明显改善舰船的聚焦效果。

2 舰船 SAR 成像几何与回波分析

舰船因风浪等影响存在六自由度运动,除直线运动(匀速、加速)外,还存在三维振荡运动和三维摇摆运动,舰船六自由度运动模型如图 1 所示,建立了振荡运动舰船和摇摆运动舰船的 SAR 成像几何并分析了回波信号特性。



图 1 舰船六自由度运动模型

2.1 振荡运动舰船 SAR 成像几何及回波信号

研究表明,舰船的振荡运动具有随机性和多倍周期的特点^[3],但使用简谐振动近似舰船的振荡运动仍然可以分析其回波及成像特点,振荡舰船 SAR 成像几何关系如图 2 所示。

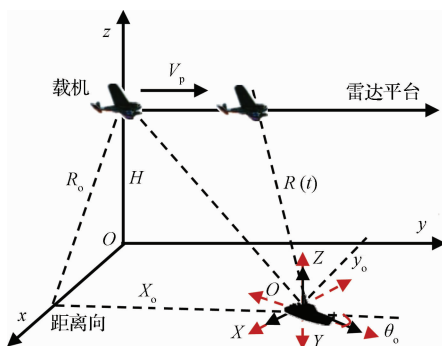


图 2 舰船振荡成像几何模型

图 2 中 $o-xyz$ 为雷达坐标系, xoy 为海平面, 雷达距海平面的高度为 H , 沿 y 方向以速度 V_p 匀速飞行。 $O-XYZ$ 为舰船参考坐标系, 其原点 O 在雷达坐标系中坐标为 $(x_0, y_0, 0)$, 其中 Y 为船头的朝向, 与 y 方向夹角为 θ_0 , 舰船沿 OX, OY, OZ 轴做横荡、纵荡、垂荡运动, P 为舰船上一散射点, 在舰船参考坐标系中坐标为 (X_T, Y_T, Z_T) 。用简谐振动近似舰船振荡运动, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 A_1, A_2, A_3 分别为舰船横荡、纵荡和垂荡运动的角频率和幅度:

$$\begin{cases} X_m = A_1 \sin(\omega_1 t) \\ Y_m = A_2 \sin(\omega_2 t) \\ Z_m = A_3 \sin(\omega_3 t) \end{cases} \quad (1)$$

舰船为刚体目标, 对于舰船上所有散射点都具有相同的振荡运动形式, 设舰船三轴向振荡运动的初相均为 0, 某时刻 P 在舰船坐标系中的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_{T_m}(t) \\ Y_{T_m}(t) \\ Z_{T_m}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T_0} + X_m \\ Y_{T_0} + Y_m \\ Z_{T_0} + Z_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

由坐标系转换求得散射点 P 在雷达坐标系中的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_T(t) \\ y_T(t) \\ z_T(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 & 0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{T_m}(t) \\ Y_{T_m}(t) \\ Z_{T_m}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(1)~(3)及成像几何可得雷达与散射点 P 之间的瞬时距离为:

$$R(t) = [R_{ref}(t)^2 + R_m^2 + 2x_0(X_{T_m} \cos\theta_0 + Y_{T_m} \sin\theta_0) + 2(y_0 - V_p t)(-X_{T_m} \sin\theta_0 + Y_{T_m} \cos\theta_0) - 2HZ_{T_m}]^{1/2} \quad (4)$$

式中: $R_{ref}(t)$ 为振荡中心到雷达的瞬时距离, R_m 为散射点 P 到 O 处的瞬时距离:

$$R_{ref}(t) = (x_0^2 + (y_0 - V_p t)^2 + H^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$R_m^2 = X_{T_m}^2(t) + Y_{T_m}^2(t) + Z_{T_m}^2(t) \quad (6)$$

研究表明海面舰船的振荡幅度 A_1, A_2, A_3 较小^[2], 即有 $R_{ref}^2(t) \gg R_m^2$, 因此对式(4)进行菲涅尔近似可得:

$$R(t) \approx R_{ref}(t) + \frac{x_0(X_{T_m} \cos\theta_0 + Y_{T_m} \sin\theta_0) - HZ_{T_m} + (y_0 - V_p t)(-X_{T_m} \sin\theta_0 + Y_{T_m} \cos\theta_0)}{R_{ref}(t)} \quad (7)$$

又 $\left(\frac{x_0}{R_{ref}(t)}, \frac{y_0 - V_p t}{R_{ref}(t)}, \frac{H}{R_{ref}(t)}\right)^T$ 为雷达波束中心法向量, 忽略微弱分量, 式(7)进一步近似为:

$$R(t) \approx R_{ref}(t) + \sum_{i=1}^3 B_i \sin(\omega_i t) \quad (8)$$

式中: B_i 为常量系数, 其值与舰船初始姿态角 θ_0 , 振荡幅度 A_i 及散射点的位置有关。

SAR 目标距离压缩处理后的回波为:

$$s(t, \tau) = C_0 \omega_a(t) \text{sinc} \left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2R(t)}{c} \right) \right] \times \exp \left(-j \frac{4\pi R(t)}{\lambda} \right) \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)得振荡舰船的 SAR 回波为:

$$s(t, \tau) = C_0 \omega_a(t) \text{sinc} \left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2R(t)}{c} \right) \right] \times \exp \left(-j \frac{4\pi R_{ref}(t)}{\lambda} \right) \times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\sum_{i=1}^3 B_i \sin(\omega_i t) \right) \right) \quad (10)$$

式中: 复常数 C_0 表示舰船散射点的后向散射系数, $\omega_a(t)$ 表示方位向窗函数, B_r 为雷达工作信号带宽, λ 为雷达工作信号波长, c 为光速, t 为距离快时间变量, τ 为方位慢时间变量。

2.2 摇摆运动舰船 SAR 成像几何及回波信号

舰船摇摆运动的 SAR 成像几何关系如图 3 所示, 船头与 y 轴夹角为 θ_0 , 舰船俯仰角、横滚角、偏航角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。舰船上一散射点 P 在舰船参考坐标系 $O-XYZ$ 中的位置为 (X_T, Y_T, Z_T) 。 $O-X'Y'Z'$ 为舰船在某时刻转动后的舰船参考坐标系。

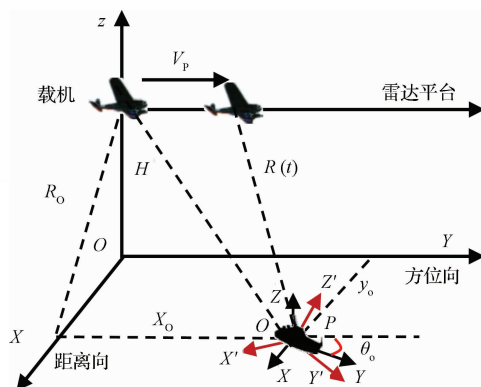


图3 舰船摇摆运动 SAR 成像几何关系

用钟摆模型近似舰船的摇摆运动,设舰船俯仰、横滚、偏航运动的角度随时间的变化分别为^[6]:

$$\begin{cases} \theta_1 = A_1 \sin(\omega_1 t) \\ \theta_2 = A_2 \sin(\omega_2 t) \\ \theta_3 = A_3 \sin(\omega_3 t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: A_1, A_2, A_3 和 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为舰船横滚、俯仰、偏航运动的幅度和角频率。

舰船散射点 P 在雷达坐标系中的位置为:

$$\begin{bmatrix} x_T(t) \\ y_T(t) \\ z_T(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T_m}(t) \\ Y_{T_m}(t) \\ Z_{T_m}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} X_{T_m}(t) \\ Y_{T_m}(t) \\ Z_{T_m}(t) \end{bmatrix} = R_{rot2} R_{rot1} \begin{bmatrix} X_{T_0} \\ Y_{T_0} \\ Z_{T_0} \end{bmatrix}$$

式中: R_{rot1} 为坐标系 $O-X'Y'Z'$ 到坐标系 $O-XYZ$ 的旋转矩阵, R_{rot2} 为坐标系 $O-XYZ$ 到坐标系 $o-xyz$ 的旋转矩阵^[6]。

$$\begin{cases} R_{rot1} = R_X(\theta_1) R_Y(\theta_2) R_Z(\theta_3) \\ R_X(\theta_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \\ 0 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \\ R_Y(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \\ R_Z(\theta_3) = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_{rot2} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 & 0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

由于海情较低时,舰船摇摆运动的幅度较小^[2],固有下面近似:

$$\sin\theta_i \approx \theta_i, \cos\theta_i \approx 1 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (14)$$

由式(10)~(14)及成像几何关系,并由菲涅尔近似可得雷达与散射点 P 之间的瞬时距离为:

$$R(t) \approx R_{ref}(t) + \frac{x_0 X_{T_m}(t) + (y_0 - V_p t) Y_{T_m}(t)}{R_{ref}(t)} -$$

$$\frac{2HZ_{T_m}(t)}{R_{ref}(t)} = R_{ref}(t) + \sum_{i=1}^3 C_i \theta_i \quad (15)$$

将式(15)代入式(9)并忽略微弱分量可得基于钟摆模型的摇摆运动舰船 SAR 回波表达式为:

$$s(t, \tau) = C_0 \omega_a(t) \text{sinc} \left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2R(t)}{c} \right) \right] \times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{ref}(t) \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\sum_{i=1}^3 D_i \theta_i \right) \right) \quad (16)$$

式中: D_i 为常数, θ_i 表达式如式(11)所示, $C_0, \omega_a(t), B_r, c, \lambda$ 等参数同式(10)。

2.3 振荡及晃动舰船回波信号统一形式

由式(8)、(15)可以发现振荡舰船和摇摆舰船的 SAR 瞬时距离表达式具有相似的形式,距离模型可以统一表示为:

$$\begin{cases} R(t) = R_{ref}(t) + \Delta R \\ \Delta R = \sum_{i=1}^3 B_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入 SAR 目标距离压缩后的回波公式可得振荡舰船和摇摆舰船回波信号的统一形式:

$$s(t, \tau) = C_0 \omega_a(t) \text{sinc} \left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0 \right) \times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{V_p^2}{2R_0} t^2 \right) \exp \left(-j \frac{4\pi K_r}{c} \frac{V_p^2}{2R_0} \tau^2 \right) \times \exp \left(-j \frac{4\pi K_r}{c} \tau \sum_{i=1}^3 B_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \right) \times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^3 B_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \right) \quad (18)$$

式中,第2个指数项表示目标的方向向信号相位,第3个指数项为雷达宏观运动引起的距离徙动,第4个指数项为振荡及摇摆运动引起的距离误差,第5个指数项表示方位附加相位,距离误差项和附加相位项包含了舰船振荡及摇摆运动的幅度、周期、相位信息。

SAR 目标回波的多普勒表达式为:

$$f_d = - \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} \quad (19)$$

将距离模型式(4)代入式(19)并将雷达宏观运动引起的多普勒和舰船产生的附加多普勒分别记为 f_D 和 f_{mD} , 则可得:

$$f_D = - \frac{2}{\lambda} \frac{1}{R(t)} [(y_0 - V_p t) \times (-V_p)] \quad (20)$$

$$f_{mD} = - \frac{2}{\lambda} \frac{1}{R(t)} \left[x_T \frac{d}{dt} x_T(t) + H \frac{d}{dt} z_T(t) + (-x_{T_m} \sin\theta_0 + y_{T_m} \cos\theta_0) \times \left(\frac{d}{dt} y_T(t) - V_p \right) + (y_0 - V_p t) \times \frac{d}{dt} y_T(t) \right] \quad (21)$$

由式(17)、(18)可知,相对于静止目标,振荡运动和摇摆运动舰船回波中存在相位误差和距离误差。相位误差具有正弦调频(sinusoidal frequency modulation, SFM)形

式,相位误差会使舰船在 SAR 图像中表现为散焦或“鬼影”。当距离分辨率较高或舰船运动幅度较大时,距离误差 ΔR 大于距离分辨单元,如不进行校正则会造成方位图像散焦。式(20)、(21)表明,运动舰船除了因雷达宏观运动产生的多普勒外,还存在由振荡和摇摆运动引起的附加多普勒,附加多普勒对宏观多普勒产生频率调制,其值与散射点在舰船坐标系中的坐标有关,且具有时变性、周期性、非线性特点。由于机载雷达速度远大于舰船振荡和摇摆运动的幅度,且舰船目标处于雷达远场,因此雷达运动引起的宏观多普勒为主要的频率成分,舰船上不同位置的散射点产生的附加多普勒近似相等。

2.4 仿真实验

设机载雷达飞行速度为 140 m/s,距地面高度为

8 km,雷达工作频率为 3.3 GHz,波束斜视角为 0 度,脉冲重复频率 PRF 为 200 Hz,场景中心斜距为 11.3 km 目标初始位置坐标为 (8 km, 10 m, 10 m),并绕场景中心 (8 km, 0 m, 0 m) 运动,表 1 所示为目标摇摆运动参数。

表 1 目标摇摆运动参数

	幅度/m	周期/s	初相/rad
横滚	0.33	4	0.785
俯仰	0	0	0
偏航	0	0	0

为了突出摇摆运动对回波信号以及成像的影响,将相同雷达参数下的 SAR 静止点目标和摇摆运动点目标的 SAR 成像结果进行了对比,如图 4 所示,左侧为静止点目

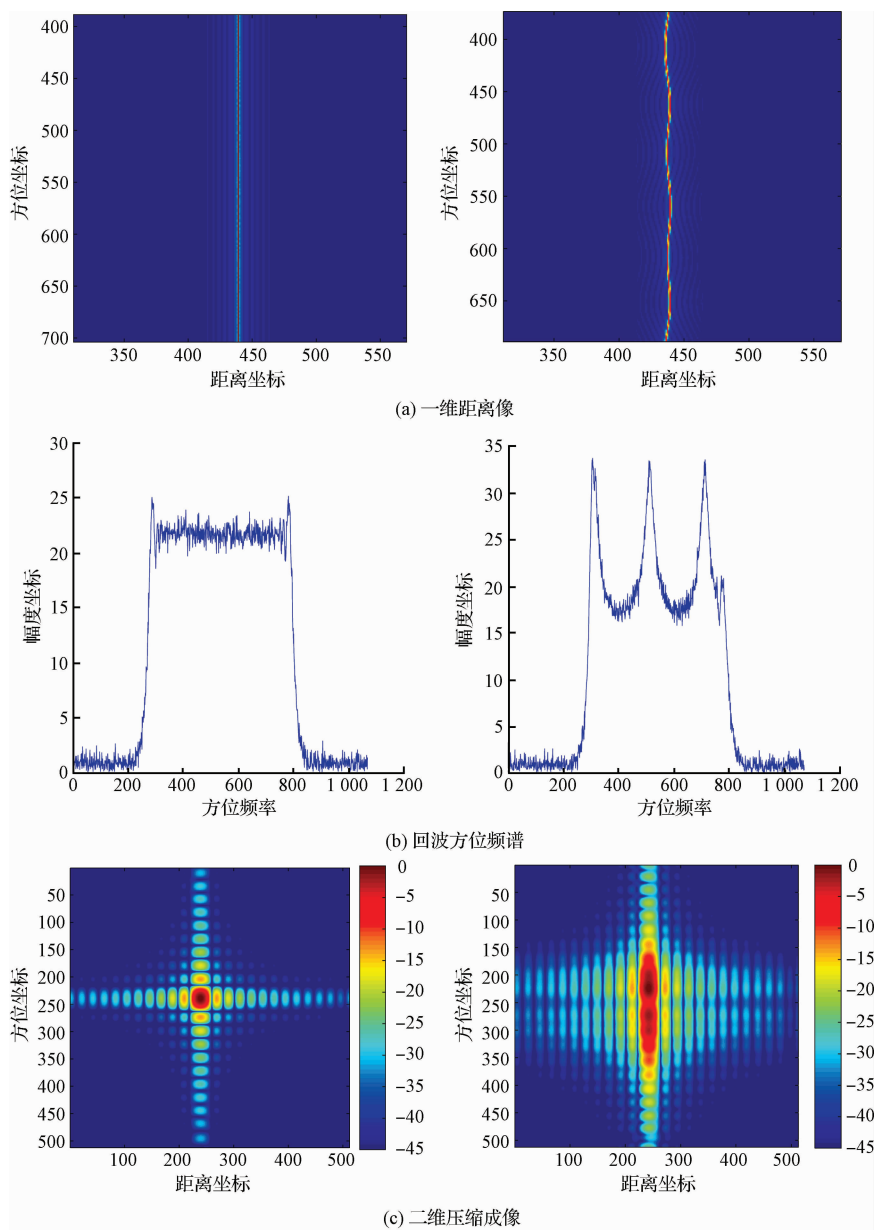


图 4 摇摆运动点目标成像性能分析

标成像结果,右侧为摇摆运动点目标成像结果。由图 4(a)可以发现相对于静止目标,摇摆目标的一位距离像存在距离误差,由图 4(b)可以发现摇摆运动目标的多普勒受附加多普勒调制,由图 4(c)~4(e)可以看出摇摆运动目标的二维成像出现了严重的散焦。

3 回波附加多普勒参数估计

由上一节分析可知振荡舰船和摇摆舰船回波的多普勒不再是线性而存在附加多普勒调制。传统的傅里叶变换只能观察到方位频率的不同分量,而不能观察到信号频率随时间的变化规律。时频分析(joint time-frequency analysis, JTFA)方法可将信号的时域分析和频域分析相结合,获得频率随时间的变化关系,常用时频变换方法有 STFT 变换、Gabor 变换、小波变换、Winger-Ville 变换等,其中 STFT 变化时域和频域分辨率相互限制, Winger-Ville 方法存在严重的交叉干扰,然而重排伪平滑 Winger-Ville 分布 (SPWV) 不仅能够抑制交叉干扰还能提高时域和频域聚集性,具有较高的时频分辨率^[14-16]。采用 SPWV 对舰船回波方位信号进行分析,获取附加多普勒的时频图像,使用峰值提取方法从时频图中获取时间-频率点。针对振荡运动(或摇摆运动)舰船附加多普勒具有 SFM 调制的形式,使用三角函数和拟合多普勒时间曲线。附加多普勒参数估计流程如图 5 所示,具体步骤如下:

1) 对距离徙动校正后的信号 $s(t)$ 进行方位向去斜处理,并补偿雷达宏观运动引起的相位。

$$S_D(t) = s(t) \times \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{V_r^2}{2R_0} t^2\right) \quad (22)$$

2) 对方位列信号 $S_D(t)$ 进行 SPWV 变换,其中 $h(\tau)$ 为时间窗函数,一般选用高斯窗。

$$\text{SPWV}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} g(u - \tau) S_D(t) \left(u + \frac{\tau}{2}\right) \times S_D(t) \left(u - \frac{\tau}{2}\right) \text{d}u e^{-j2\pi f\tau} \text{d}\tau \quad (23)$$

3) 使用峰值提取法从时频图 $\text{SPWV}(t, f)$ 中提取时频曲线 $p(t_i)$ 。

4) 用三角函数和拟合曲线获取附加多普勒参数,拟合函数和代价函数分别为:

$$f(t) = \sum_{i=1}^3 A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (24)$$

$$F = \sum_{i=1}^N \|f(t_i) - p(t_i)\|^2 \rightarrow \min \quad (25)$$

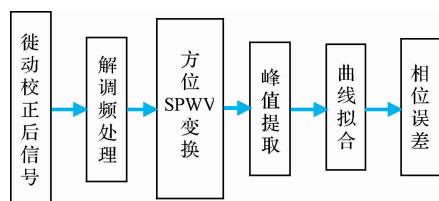


图 5 附加多普勒参数提取流程

使用表 1 中目标的摇摆运动参数,图 5 所示为流程提取附加多普勒信息,仿真结果如图 6 所示,图 6(a)所示为附加多普勒时频图,图 6(b)所示为提取的附加多普勒时间曲线和拟合结果,可以发现该方法可以较好的提取附加多普勒参数。

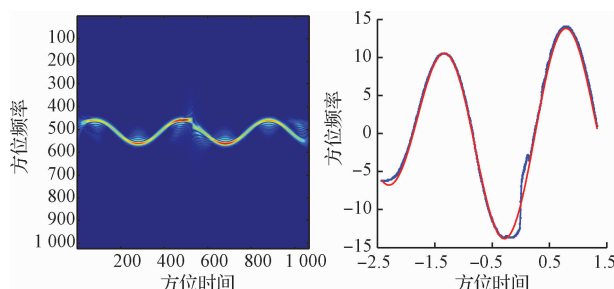


图 6 附加多普勒提取与估计

4 基于参数估计的摇摆(振荡)舰船成像方法

距离多普勒算法(range Doppler, RD)算法是 SAR 成像常用算法,传统 RD 算法适用于静止目标成像,对海面运动舰船 RD 算法却不能获得聚焦 SAR 舰船图像,由前面分析可知振荡舰船和摇摆舰船回波存在距离误差、附加多普勒调制、频谱展宽、方位信号相位误差等现象,不同于线性运动(匀速直线)舰船,振荡舰船和摇摆舰船回波方位调频率不再是常量,而是时变的,因此基于直线运动的成像方法也不能适用。针对调频率的时变特性,本文提出了基于 SPWV 变换的附加多普参数提取与相位补偿的 SAR 成像流程,在常规的 RD 成像算法中加入参数估计与误差补偿环节改善舰船成像的聚焦效果。

对于距离误差,由于海面舰船运动的非合作性,无法使用几何方法进行校正,新的成像流程中引入 ISAR 处理中的包络最小熵法对距离误差进行校正,相比于其他包络对齐方法(相关法、最大峰值法),包络最小熵法具有更好的稳健性和实用性^[11-12,17]。对于方位相位误差,针对不同位置散射点的摇摆幅度不同导致相位历程不同的问题,用图 5 所示的处理流程对振荡(摇摆)运动舰船 SAR 距离压缩后的回波方位信号进行处理,提取并估计附加多普勒参数,然后估计并补偿方位相位误差。具体算法处理流程如图 7 所示。

4.1 仿真实验与结果分析

美国桑迪亚实验室给出的研究报告表明,舰船摇摆运动的幅度和频率与舰船的结构、海情等因素相关,且相比俯仰运动和偏航运动,舰船横滚运动的幅度较大为主要的摇摆分量^[2]。仿真舰船摇摆运动参数如表 2 所示。

表 2 仿真舰船摇摆运动参数表

	幅度/m	周期/s	初相/rad
横滚	0.21	6.2	0
俯仰	0.02	6.7	0
偏航	0.008	14.2	0

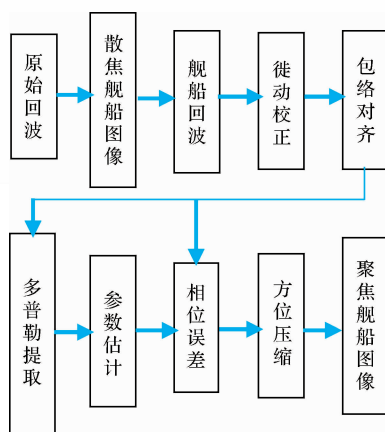


图7 基于参数估计与补偿的成像流程

使用同2.4节相同的机载雷达仿真参数,舰船的船头朝向方向与载机航向的夹角为 120° ,舰船结构参数为长105 m,宽35 m,高20 m,舰船晃动以及振荡运动的参数如表3、4所示。使用图7所示算法流程对回波数据进行成像处理,仿真结果如图8、9所示,图8、9分别为摇摆运动舰船和振荡舰船仿真结果,图8(a)、9(a)为传统RD算法

表3 仿真舰船振荡运动参数

	幅度/m	周期/s	初相/rad
横荡	0.28	3	0.785
纵荡	0.03	4	0.785
垂荡	0.05	5	0.785

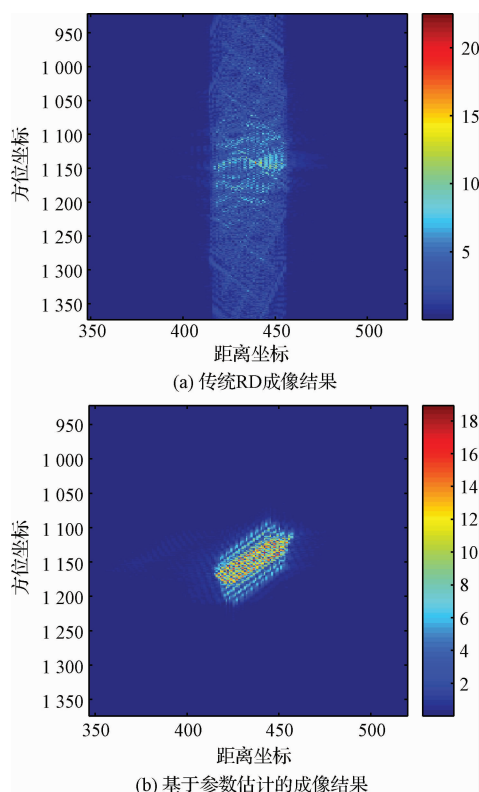
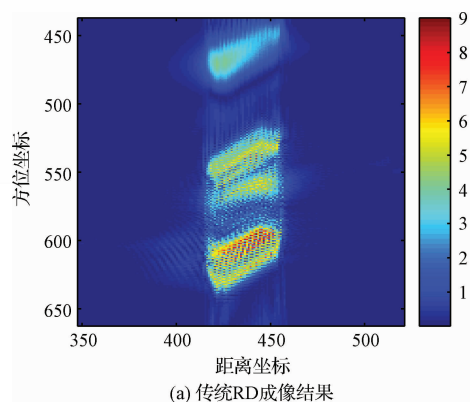
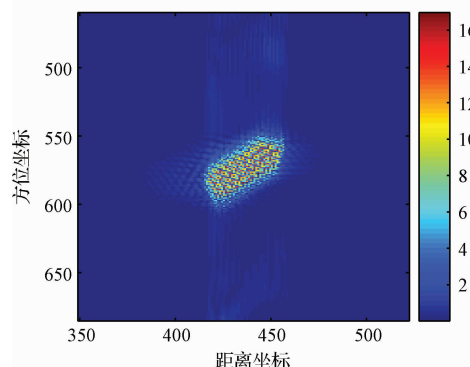


图8 摇摆运动舰船成像仿真结果



(a) 传统RD成像结果



(b) 基于参数估计的成像结果

图9 振荡运动舰船仿真结果

成像结果,图8(b)、9(b)为本文所提成像方法的成像结果。由仿真结果可以发现本文方法可以明显改善振荡运动舰船和摇摆运动舰船的SAR聚焦成像效果。

5 结论

首先建立了振荡运动舰船和摇摆运动舰船SAR成像几何模型,然后在成像几何的基础上推导分析了回波特点,得出振荡舰船和摇摆舰船回波存在SFM相位调制、信号频谱展宽、距离误差、时变附加多普勒调制等特点,并且针对回波特点提出了包括包络最小熵距离对准、附加多普勒参数估计及相位补偿等步骤的成像流程,最后通过仿真实验证明了该方法可以明显改善振荡舰船和摇摆舰船SAR聚焦成像的效果。

参考文献

- [1] BON N, HAJDUCH G, KHENCHAF A, GARELLO R, QUELLEC J. -M, Recent developments in detection, imaging and classification for airborne maritime surveillance[J]. IET Signal Process, 2008, 2(3): 192-203.
- [2] ARMIN W. DOERRY. Ship dynamics for maritime ISAR imaging[R]. Sandia National Laboratories, 2008.
- [3] 雷杰,邢孟道,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.
- [4] 李斌,孙显,吴其昌. 一种基于活动基模型的近岸舰

- 船检测算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 17-21.
- [5] BIN G, DUC V, LUZHOU X, et al. Ground moving target indication via multichannel airborne SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10):3753-3764.
- [6] XING H Y, ZHANG Q, LU CH X. Adaptive stochastic resonance method for weak signal detection based on particle swarm optimization[J]. Instrumentation, 2015, 1(2): 3-10.
- [7] 云亚娇, 齐向阳, 李宁. 基于参数估计的海面运动舰船 SAR 成像方法 [J]. 雷达学报, 2016, 5(3): 326-332.
- [8] MARTORELLA M, PASTINA D, BERIZZI F, et al. Spaceborne radar imaging of maritime moving targets with the cosmo-skymed SAR system[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(7):2797-2810.
- [9] 高骥超, 王小青, 种劲松. 一种基于序列 SAR 图像的海浪对消方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 57-60.
- [10] 杨秋, 张群, 王敏, 孙莉. 基于机载窄带雷达的舰船目标多普勒特性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015(12): 2733-2738.
- [11] 许小剑, 姜丹, 李晓飞. 时变海面舰船目标动态雷达特征信号模型[J]. 系统工程与电子技术, 2011(1): 42-47.
- [12] PARK J W, WON J S. An efficient method of Doppler parameter estimation in the time-frequency domain for a moving object form TerraSAR-X data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(12): 4771-4787.
- [13] 周辉, 赵凤军, 禹卫东. SAR 运动目标微动信号模型及微多普勒效应研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 135-142.
- [14] 史洪印, 赵欣悦. 基于 CS 的 SAR 旋转微动目标检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1342-1349.
- [15] CHEN V C, LI F Y, HO S Y. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace, 2006.
- [16] CARMINE C. Vibrating target micro-Doppler signature in bistatic SAR with a fixed receiver[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(8):3219-3227.
- [17] 张利军, 张民, 刘勃, 刘兴霞. 基于混合时频分析方法的 ISAR 成像研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4):563-568.

作者简介

杨传安, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为海面运动舰船 SAR 成像。

E-mail: yang_an1991@163.com

齐向阳, 1974 年出生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载 SAR 系统仿真、高分辨率成像技术和成像新体制。

E-mail: qixy@mail.ie.ac.cn

李宁, 1987 年出生, 助理研究员, 博士, 研究方向为合成孔径雷达信号处理。

E-mail: Lning_nuaa@163.com