

# 船只目标三维转动对 SAR 成像影响的定量分析

周 鹏<sup>1</sup>, 尹晓舜<sup>1</sup>, 张 晰<sup>2</sup>, 张振华<sup>3</sup>, 王 影<sup>3</sup>, 张 杰<sup>1</sup>

(1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580;

2 自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061;

3 北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 在分析船只三维转动(横滚、俯仰、偏航)对合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像质量的影响方面, 现有文献只考虑了仅存在一维转动时的影响, 未考虑三维转动同时存在时对 SAR 成像质量的影响。另外, 现有文献主要基于船只转动对船只散射点瞬时多普勒频率的影响进行分析, 并未真正与对 SAR 图像质量的影响关联起来。本文推导了适用于船只存在三种一维转动、同时存在三维转动时的 SAR 图像二维时域表达式, 以及散射点方位向坐标的表达式。在上述表达式的基础上, 通过分析船只上的散射点在 SAR 图像中的偏移情况, 扩展到分析船只整体在 SAR 图像中的形变情况; 通过分析一维转动对 SAR 成像的影响, 扩展到分析三维转动同时存在时对 SAR 成像的影响。研究表明: 船只三维转动引入了包络误差和相位误差, 导致 SAR 图像中散射点模糊并在方位向偏移, 且不同散射点的偏移量不同, 从而使船只形状发生畸变。仿真结果验证了所推导表达式的准确性及理论分析的正确性。

**关键词:** 船只目标; 三维转动; SAR 成像; SAR 图像质量; 定量分析

中图分类号: TN957.52; V243.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)02-0100-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220823001

引用格式: 周鹏, 尹晓舜, 张晰, 等. 船只目标三维转动对 SAR 成像影响的定量分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 100-111.

## Quantitative analysis of the influence of three-dimensional rotations of ship targets on SAR imaging quality

ZHOU Peng<sup>1</sup>, YIN Xiaoshun<sup>1</sup>, ZHANG Xi<sup>2</sup>, ZHANG Zhenhua<sup>3</sup>, WANG Ying<sup>3</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

3. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In terms of analyzing the effect of a ship's three-dimensional rotations including the roll, the pitch and the yaw on imaging quality of synthetic aperture radar(SAR), the existing literatures only consider the effect when only one-dimensional rotation exists, and do not consider the effect when three-dimensional rotations exist simultaneously. In addition, the existing literatures mainly analyze the effect of the ship rotation on the instantaneous Doppler frequency of a scatterer on the ship, which is not directly related to the effect on SAR image quality. This paper derives two-dimensional time-domain expression of the SAR image and the expressions of azimuth coordinates of ship scatterers when there are only one kind rotation or three-dimensional rotations at the same time. Based on the derived formula, after analyzing the offset of the scatterer on the ship in the SAR image, we analyze the deformation of the whole ship in the SAR image. After analyzing the influence of one-dimensional rotation on SAR imaging, we analyze the influence of three-dimensional rotations on SAR imaging. The research shows that the three-dimensional rotations of the ship introduces envelope error and phase error, which causes the scattering points in the SAR image to be blurred and shift in azimuth, and different scattering points have different offsets, so that the shape of the ship is distorted. The simulation results verify the accuracy of the derived expressions and the correctness of the theoretical analysis.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(61931025); 山东省自然科学基金(ZR2019MF004); 国家自然科学基金项目(61971455)

通信作者: 周鹏(zhoupeng@upc.edu.cn)

收稿日期: 2022-08-23 修回日期: 2022-10-10

**Keywords:** Ship target; Three-dimensional rotation; SAR imaging; SAR image quality; Quantitative analysis

**Citation:** ZHOU Peng, YIN Xiaoshun, ZHANG Xi, et al. Quantitative analysis of the influence of three-dimensional rotations of ship targets on SAR imaging quality[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 100–111.

## 引言

合成孔径雷达具有全天时、全天候、分辨率高等优点<sup>[1]</sup>, 研究SAR船只目标成像技术对于海洋溢油监视、失事船只救助等领域具有重要意义<sup>[2,3]</sup>。SAR成像机制要求目标处于静止状态, 但由于海面波浪等因素的综合作用, 海上船只会出现横滚、俯仰、偏航这三种转动<sup>[4,5]</sup>, 导致SAR图像出现扭曲、模糊等现象<sup>[6]</sup>。

针对船只目标的三维转动对SAR成像的影响, 已有学者进行过相关研究。Kazuo Ouchi等人<sup>[7]</sup>于2002年描述了在RADARSAT图像中观测到的船只不均匀方位偏移现象, 认为船只的俯仰运动是造成不均匀方位偏移现象的主要原因。该研究首次揭示了船只转动与SAR成像之间存在联系, 但并没有深入到SAR原理的层面。2011年, 蔡彦宁<sup>[8]</sup>推导了船只仅存在一维转动时的瞬时多普勒频率公式, 但该文中雷达平台高度为零等假设并不合理, 影响了最终结果的可信度。2017年, 刘鹏等人<sup>[9]</sup>利用数值模拟的方法, 较详细地分析了船只在SAR图像中的失真与船只尺寸、船只转动角速度等参数间的关系。但文中没有给出散射点失真与散射点位置、船只转动角速度等参数间关系的定量公式, 并且仅讨论了一维转动对SAR成像的影响。2021年, Zhou<sup>[10]</sup>推导了船只在横滚转动影响下的瞬时多普勒频率的表达式, 结合实测姿态数据分析了横滚对SAR成像的影响。但在实际情况中, 船只不可能只存在一维转动, 该文并没有考虑三维转动同时存在时对SAR成像的影响。

综上所述, 目前已有的文献都是对散射点瞬时多普勒频率的变化进行分析, 这种分析不够直观, 无法真正反映出SAR图像的失真情况。此外, 现有研究也完全避开了横滚、俯仰、偏航同时存在时对SAR成像影响的分析, 而这是理论与实际相联系的关键一环。本文借助驻定相位原理、级数反演法等工具, 系统地推导了船只仅存在一维转动和同时存在三维转动时的SAR图像二维时域表达式, 以及散射点方位向坐标的表达式<sup>[11,12]</sup>。在

此基础上, 分析了SAR图像中散射点的偏移情况以及船只整体的形变情况。最后, 通过仿真实验验证了所推导表达式的准确性及理论分析的正确性。

## 1 SAR船只成像几何关系与回波模型

### 1.1 几何关系

图1为条带SAR对船只成像的示意图, 雷达平台以速度 $v$ 做匀速直线运动, 其距海平面的高度为 $h$ 。以船只中心 $O$ 为原点建立直角坐标系 $XYZ$ , 其中 $X$ 轴包含于海平面中并垂直于雷达平台航迹,  $Y$ 轴平行于雷达平台航迹。为了简化分析, 假设船身方向与 $X$ 轴一致, 船头对应 $X$ 轴的负方向。在雷达对船只目标观测时间内, 船只绕 $X$ 轴作横滚转动, 绕 $Y$ 轴作俯仰转动, 绕 $Z$ 轴作偏航转动。本文关注的是船只三维转动对SAR图像质量的影响, 因此假设船只不存在平动。 $O$ 点距离雷达平台的最短斜距为 $r$ ,  $l$ 为最短斜距 $r$ 在海平面上的投影。点 $P$ 为船只上的某散射点, 其坐标表示为 $(x, y, z)$ 。

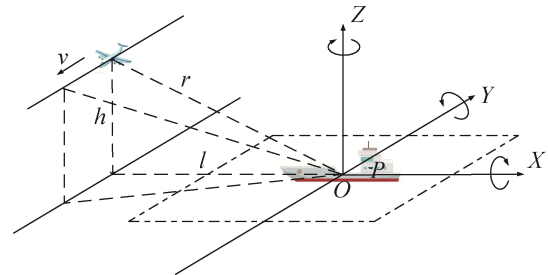


图1 船只SAR成像几何关系

Fig.1 Geometric relationship of ship SAR imaging

### 1.2 回波模型

根据几何关系, 点 $P$ 到雷达平台的最短斜距 $R_0$ 为:

$$R_0 = \sqrt{(l+x)^2 + y^2 + (h-z)^2} \quad (1)$$

点 $P$ 经偏航、俯仰、横滚三维转动后的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \text{Rot}[\theta_r(t), \theta_p(t), \theta_y(t)] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{Rot}[\theta_r(t), \theta_p(t), \theta_y(t)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_r(t) & -\sin \theta_r(t) \\ 0 & \sin \theta_r(t) & \cos \theta_r(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_p(t) & 0 & \sin \theta_p(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_p(t) & 0 & \cos \theta_p(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y(t) & -\sin \theta_y(t) & 0 \\ \sin \theta_y(t) & \cos \theta_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\text{Rot}[\theta_r(t), \theta_p(t), \theta_y(t)]$  是船只三维转动矩阵<sup>[13]</sup>,  $\theta_r(t)$ 、 $\theta_p(t)$ 、 $\theta_y(t)$  分别为横滚角、俯仰角、偏航角。根据船只水动力学理论, 船只的转动角度可近似用正弦函数表示<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \theta_r(t) = A_r \sin(\Omega_r t + \varphi_r) \\ \theta_p(t) = A_p \sin(\Omega_p t + \varphi_p) \\ \theta_y(t) = A_y \sin(\Omega_y t + \varphi_y) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $A_r$ 、 $A_p$ 、 $A_y$  为转动角的幅度,  $\Omega_r$ 、 $\Omega_p$ 、 $\Omega_y$  为转动角频率,  $\varphi_r$ 、 $\varphi_p$ 、 $\varphi_y$  为初相位。

点  $P$  到雷达平台的瞬时距离为:

$$R(t) = \sqrt{(vt+y')^2 + (l+x')^2 + (h-z')^2} \quad (5)$$

假设雷达发射的是线性调频信号:

$$s(\tau) = \text{rect}(\tau/T_r) \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi K_r \tau^2) \quad (6)$$

其中,  $\tau$  为距离向时间,  $T_r$  为脉冲宽度,  $\text{rect}$  为矩形函数,  $f_c$  为载频,  $K_r$  为调频斜率。

对于散射点  $P$ , 经正交解调后的回波信号为:

$$s_o(\tau, t) = w_r(\tau) \cdot w_a(t) \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left[\tau - 2R(t)/c\right]^2\right\} \cdot \exp\left[-j4\pi R(t)/\lambda\right] \quad (7)$$

其中,  $t$  为方位向时间,  $\lambda$  表示波长,  $w_r(\tau)$  为距离向包络,  $w_a(t)$  为方位向包络。

## 2 理论公式推导

本文采用距离多普勒算法对式 (7) 所描述的点目标回波信号进行处理。将式 (5) 在  $t=0$  时刻进行泰勒展开后可得:

$$R(t) = R_0 + K_1 t + K_2 t^2/2 + K_3 t^3/6 \quad (8)$$

其中,  $K_1 = R'(t)|_{t=0}$ ,  $K_2 = R''(t)|_{t=0}$ ,  $K_3 = R'''(t)|_{t=0}$ 。

选取匹配滤波器  $H_r(f_r) = \text{rect}\{f_r/(|K_r|T_r)\} \exp\{j\pi f_r^2/|K_r|\}$ , 对式(7)进行距离向脉压后可得:

$$s_{rc}(\tau, t) = C_0 \text{sinc}\left[\tau - 2R(t)/c\right] w_a(t) \exp\left\{-j4\pi R(t)/\lambda\right\} \quad (9)$$

对式 (9) 进行方位向傅里叶变换后可得:

$$S_1(\tau, f_t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{rc}(\tau, t) e^{-j2\pi f_t t} dt \quad (10)$$

式中, 积分号内的相位为:

$$\varphi(t) = -2\pi f_t t - 4\pi R(t)/\lambda = -2\pi f_t t - 4\pi(R_0 + K_1 t + K_2 t^2/2 + K_3 t^3/6)/\lambda \quad (11)$$

利用驻定相位原理, 令  $\varphi'(t)|_{t=t_k} = 0$ , 求得时频

关系为:

$$f_t = -2K_1/\lambda - 2K_2 t_k/\lambda - K_3 t_k^2/\lambda \quad (12)$$

利用级数反演法, 求得  $t_k(f_t)$ :

$$t_k(f_t) = A_1(f_t + A_0) + A_2(f_t + A_0)^2 \quad (13)$$

其中,  $A_0 = 2K_1/\lambda$ ,  $A_1 = -\lambda/(2K_2)$ ,  $A_2 = -\lambda^2 K_3/(8K_2^3)$ 。

将式 (13) 代入式 (9) 中, 得到方位向频域信号为:

$$S_1(\tau, f_t) = C_0 \text{sinc}\left[\tau - 2R_{af}(f_t)/c\right] w_{af}(f_t) \exp\left\{-j4\pi R_{af}(f_t)/\lambda\right\} \quad (14)$$

其中,  $w_{af}(f_t)$  是对  $w_a(t)$  利用式 (13) 进行变量替换后关于  $f_t$  的函数, 另有:

$$R_{af}(f_t) = R_0 - \frac{\lambda K_1}{2K_2} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right) + \frac{\lambda^2 K_2^2 - \lambda^2 K_1 K_3}{8K_2^3} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right)^2 - \frac{\lambda^3 K_3}{48K_2^3} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right)^3 - \frac{\lambda^4 K_3^2}{192K_2^5} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right)^4 \quad (15)$$

对式 (14) 进行距离徙动校正后可得:

$$S_1(\tau, f_t) = C_0 \text{sinc}\left[\tau - 2R_{rnc}(f_t)/c\right] w_{af}(f_t) \exp\left\{-j4\pi R_{af}(f_t)/\lambda\right\} \quad (16)$$

其中:

$$R_{rnc}(f_t) = R_0 - \frac{\lambda K_1}{2K_2} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right) + \frac{\lambda^2 K_2^2 - \lambda^2 K_1 K_3}{8K_2^3} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right)^2 - \frac{\lambda^3 K_3}{48K_2^3} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right)^3 - \frac{\lambda^4 K_3^2}{192K_2^5} \left(f_t + \frac{2K_1}{\lambda}\right)^4 - \frac{\lambda^2 R_0 f_t^2}{8v^2} \quad (17)$$

选取匹配滤波器  $H_a(f_t) = \exp\left\{-j\pi \lambda R_0 f_t^2/(2v^2)\right\}$ , 对式 (16) 进行方位向脉压后可得:

$$\begin{aligned}
S_2(\tau, f_i) = & C_0 \text{sinc} \left[ B \left( \tau - \frac{2R_{\text{rnc}}(f_i)}{c} \right) \right] w_a \left[ -\frac{\lambda}{2K_2} \left( f_i + \frac{2K_1}{\lambda} \right) - \frac{\lambda^2 K_3}{8K_2^3} \left( f_i + \frac{2K_1}{\lambda} \right)^2 \right] \\
& \cdot \exp \left\{ j \left[ -\frac{4\pi R_0}{\lambda} - \frac{2\pi R_0 K_1^2}{v^2 \lambda} + \frac{2\pi R_0 K_1}{v^2} \left( f_i + \frac{2K_1}{\lambda} \right) + \left( \frac{\pi \lambda}{2K_2} - \frac{\pi \lambda R_0}{2v^2} \right) \left( f_i + \frac{2K_1}{\lambda} \right)^2 \right] \right\} \\
& \cdot \exp \left\{ j \left[ \frac{\pi \lambda^2 K_3}{3K_2^3} \left( f_i + \frac{2K_1}{\lambda} \right)^3 + \frac{\pi \lambda^3 K_3^2}{48K_2^5} \left( f_i + \frac{2K_1}{\lambda} \right)^4 \right] \right\} \quad (18)
\end{aligned}$$

对式(18)进行方位向逆傅里叶变换后可得:

$$s(\tau, t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_2(\tau, f_i) e^{j2\pi f_i t} df_i \quad (19)$$

利用驻定相位原理和级数反演法,求得时频关系为:

$$f_k(t) = D_1 \left( t + R_0 K_1 / v^2 \right) + D_2 \left( t + R_0 K_1 / v^2 \right)^2 + D_3 \left( t + R_0 K_1 / v^2 \right)^3 \quad (20)$$

将式(20)代入式(18)中,经过一系列复合运算可以得到最终的SAR图像二维时域表达式为:

$$\begin{aligned}
s(\tau, t) = & C_0 \cdot \text{sinc} \left\{ B \left[ \tau - \frac{2R_e(t)}{c} \right] \right\} \cdot \rho_a \left\{ -\frac{\lambda}{2K_2} \right. \\
& \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right] \\
& - \frac{\lambda^2 K_3}{8K_2^3} \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right]^2 \left. \right\} \\
& \exp \left\{ j \left[ -\frac{4\pi R_0}{\lambda} - \frac{2\pi R_0 K_1^2}{v^2 \lambda} + \frac{2\pi R_0 K_1}{v^2} \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right] + \left( \frac{\pi \lambda}{2K_2} - \frac{\pi \lambda R_0}{2v^2} \right) \right. \\
& \left. \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right]^2 \right] \right\} \\
& \exp \left\{ j \left[ \frac{\pi \lambda^2 K_3}{3K_2^3} \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right]^3 + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{\pi \lambda^3 K_3^2}{48K_2^5} \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right]^4 \right] \right\} \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{其中, } D_1 = & \frac{2v^2 K_2}{\lambda R_0 K_2 - \lambda v^2}, \quad D_2 = \frac{4v^6 K_3}{\lambda (R_0 K_2 - v^2)^3}, \quad D_3 = \\
& \frac{2v^8 K_3^2 (23v^2 + R_0 K_2)}{3\lambda K_2 (R_0 K_2 - v^2)^5},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_e(t) = & R_0 - \frac{R_0 K_1^2}{2v^2} + \left( \frac{\lambda R_0 K_1}{2v^2} - \frac{\lambda K_1}{2K_2} \right) \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + \right. \\
& \left. D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 + \left( \frac{\lambda^2 K_2^2 - \lambda^2 K_1 K_3}{8K_2^3} - \frac{\lambda^2 R_0}{8v^2} \right) \right. \\
& \left. \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right]^2 - \frac{\lambda^3 K_3}{48K_2^3} \right. \\
& \left. \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right]^3 - \frac{\lambda^4 K_3^2}{192K_2^5} \right. \\
& \left. \left[ D_1 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right) + D_2 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^2 + D_3 \left( t + \frac{R_0 K_1}{v^2} \right)^3 \right]^4 \right]
\end{aligned}$$

在式(21)中, sinc函数表示距离向包络,  $\rho_a$ 函数表示方位向包络, exp函数对应的指数项则表示相位误差<sup>[15]</sup>。式(21)可以视为一个统一表达式,对于不同类型的转动而言,只是瞬时距离 $R(t)$ 有所差异,因此只需要将相应的 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 代入式(21)即可得到受某种转动影响下的二维时域表达式。经过对式(21)的研究,分别推导出了横滚、俯仰、偏航以及三维转动同时影响下的求解SAR图像中船只散射点方位向坐标的表达式。此外,船只转动还引入了距离向包络误差以及各阶相位误差,将会造成成像模糊、出现鬼影等问题。

① 船只仅存在横滚时,可以得到 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 为:

$$\begin{cases} K_1 = (vy - hyA_r \Omega_r \cos \varphi_r) / R_0 \\ K_2 = -(vy - hyA_r \Omega_r \cos \varphi_r)^2 / R_0^3 + \\ \quad (v^2 - 2vzA_r \Omega_r \cos \varphi_r) / R_0 \\ K_3 = 3(vy - hyA_r \Omega_r \cos \varphi_r)^3 / R_0^5 - \\ \quad 3(vy - hyA_r \Omega_r \cos \varphi_r)(v^2 - 2vzA_r \Omega_r \cos \varphi_r) / R_0^3 + \\ \quad hyA_r \Omega_r^3 \cos \varphi_r / R_0 \end{cases} \quad (22)$$

求解得出的 SAR 图像中船只散射点方位向坐标的表达式为:

$$y_a = v \cdot (-R_0 K_1 / v^2) = (hyA_r \Omega_r \cos \varphi_r - vy) / v \quad (23)$$

② 船只仅存在俯仰时, 可以得到  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为:

$$\left\{ \begin{aligned} K_1 &= (vy + lzA_p \Omega_p \cos \varphi_p + hxA_p \Omega_p \cos \varphi_p) / R_0 \\ K_2 &= -(vy + lzA_p \Omega_p \cos \varphi_p + hxA_p \Omega_p \cos \varphi_p)^2 / R_0^3 + \\ &\quad \left[ v^2 + (zA_p \Omega_p \cos \varphi_p)^2 + (xA_p \Omega_p \cos \varphi_p)^2 \right] / R_0 \\ K_3 &= 3(vy + lzA_p \Omega_p \cos \varphi_p + hxA_p \Omega_p \cos \varphi_p)^3 / R_0^5 - \\ &\quad 3(vy + lzA_p \Omega_p \cos \varphi_p + hxA_p \Omega_p \cos \varphi_p) \cdot \\ &\quad \left[ v^2 + (zA_p \Omega_p \cos \varphi_p)^2 + (xA_p \Omega_p \cos \varphi_p)^2 \right] / R_0^3 - \\ &\quad hyA_p \Omega_p^3 \cos \varphi_p / R_0 \end{aligned} \right. \quad (24)$$

求解得出的 SAR 图像中船只散射点方位向坐标的表达式为:

$$y_a = -(vy + lzA_p \Omega_p \cos \varphi_p + hxA_p \Omega_p \cos \varphi_p) / v \quad (25)$$

③ 船只仅存在偏航时, 可以得到  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为:

$$\left\{ \begin{aligned} K_1 &= [yv - yhA_r \Omega_r \cos \varphi_r - ylA_y \Omega_y \cos \varphi_y + (zl + xh) A_p \Omega_p \cos \varphi_p] / R_0 \\ K_2 &= -[yv - yhA_r \Omega_r \cos \varphi_r - ylA_y \Omega_y \cos \varphi_y + (zl + xh) A_p \Omega_p \cos \varphi_p]^2 / R_0^3 \\ &\quad + [v^2 + 2vxA_y \Omega_y \cos \varphi_y - 2vzA_r \Omega_r \cos \varphi_r + (x^2 + y^2) A_y^2 \Omega_y^2 \cos^2 \varphi_y \\ &\quad + (x^2 + y^2) A_p^2 \Omega_p^2 \cos^2 \varphi_p + (y^2 + z^2) A_r^2 \Omega_r^2 \cos^2 \varphi_r - 2xhA_r \Omega_r \cos \varphi_r A_y \Omega_y \cos \varphi_y - 2yhA_p \Omega_p \cos \varphi_p A_y \Omega_y \cos \varphi_y] / R_0 \\ K_3 &= 3[yv - yhA_r \Omega_r \cos \varphi_r - ylA_y \Omega_y \cos \varphi_y + (zl + xh) A_p \Omega_p \cos \varphi_p]^3 / R_0^5 \\ &\quad - 3[yv - yhA_r \Omega_r \cos \varphi_r - ylA_y \Omega_y \cos \varphi_y + (zl + xh) A_p \Omega_p \cos \varphi_p] \\ &\quad \cdot [v^2 + 2vxA_y \Omega_y \cos \varphi_y - 2vzA_r \Omega_r \cos \varphi_r + (x^2 + y^2) A_y^2 \Omega_y^2 \cos^2 \varphi_y + (x^2 + y^2) A_p^2 \Omega_p^2 \cos^2 \varphi_p \\ &\quad + (y^2 + z^2) A_r^2 \Omega_r^2 \cos^2 \varphi_r - 2xhA_r \Omega_r \cos \varphi_r A_y \Omega_y \cos \varphi_y - 2yhA_p \Omega_p \cos \varphi_p A_y \Omega_y \cos \varphi_y] / R_0^3 \\ &\quad + [6vxA_r \Omega_r \cos \varphi_r A_p \Omega_p \cos \varphi_p + yhA_r \Omega_r^3 \cos \varphi_r + yhA_y \Omega_y^3 \cos \varphi_y - (zl + xh) A_p \Omega_p^3 \cos \varphi_p \\ &\quad - 6xzA_r^2 \Omega_r^2 \cos^2 \varphi_r A_p \Omega_p \cos \varphi_p + 6xyA_r^2 \Omega_r^2 \cos^2 \varphi_r A_y \Omega_y \cos \varphi_y - 6xyA_p^2 \Omega_p^2 \cos^2 \varphi_p A_y \Omega_y \cos \varphi_y] / R_0 \end{aligned} \right. \quad (26)$$

求解得出的 SAR 图像中船只散射点方位向坐

$$\left\{ \begin{aligned} K_1 &= (vy - lyA_y \Omega_y \cos \varphi_y) / R_0 \\ K_2 &= -(vy - lyA_y \Omega_y \cos \varphi_y)^2 / R_0^3 + \\ &\quad \left[ v^2 + 2vxA_y \Omega_y \cos \varphi_y + (xA_y \Omega_y \cos \varphi_y)^2 + \right. \\ &\quad \left. (yA_y \Omega_y \cos \varphi_y)^2 \right] / R_0 \\ K_3 &= 3(vy - lyA_y \Omega_y \cos \varphi_y)^3 / R_0^5 - \\ &\quad 3(vy - lyA_y \Omega_y \cos \varphi_y) \cdot \\ &\quad \left[ v^2 + 2vxA_y \Omega_y \cos \varphi_y + (xA_y \Omega_y \cos \varphi_y)^2 + \right. \\ &\quad \left. (yA_y \Omega_y \cos \varphi_y)^2 \right] / R_0^3 - lyA_y \Omega_y^3 \cos \varphi_y / R_0 \end{aligned} \right. \quad (26)$$

求解得出的 SAR 图像中船只散射点方位向坐标的表达式为:

$$y_a = -\frac{R_0 K_1}{v} \pm \left| v \left[ \sqrt{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{D_2}{3D_3} \right] \right| \quad (27)$$

其中,  $p = \frac{3D_3 D_1 - D_2^2}{3D_3^2}$ ,  $q = \frac{27D_3^2 D - 9D_3 D_2 D_1 + 2D_2^3}{27D_3^3}$ , 散射点的方位向坐标小于等于零时取正号, 反之, 取负号。

④ 船只同时存在三维转动时, 可以得到  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为:

标的表达式为:

$$y_a = -[yv - yhA_r\Omega_r \cos \varphi_r - ylA_y\Omega_y \cos \varphi_y + (zl + xh) A_p\Omega_p \cos \varphi_p] / v \quad (29)$$

### 3 船只转动对成像影响的理论分析与仿真实验

本节通过给公式中的参数赋值，分别计算了横滚、俯仰、偏航以及同时存在三维转动这四种

情况下散射点的方位向坐标，进而分析船只的形变情况。

为了验证定量分析结果，利用MATLAB进行了船只成像仿真实验。如图2所示，利用多个散射点构成了一个简易的船只模型，船只长度为200 m，宽度为80 m，高度为2 m。

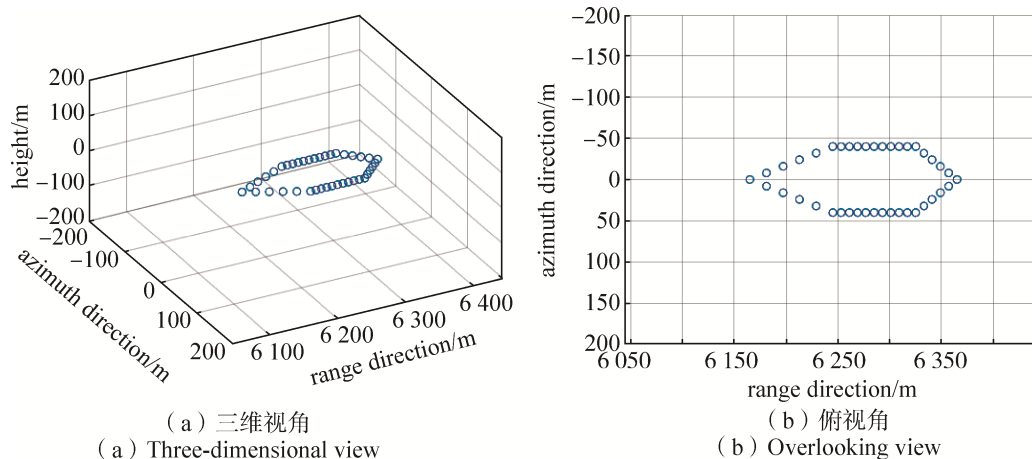


图2 船只散射点模型

Fig.2 Ship scattering point model

计算和仿真过程中使用的参数如表1所示。当只存在一种转动时，另两种转动的转动幅度设置为零。

#### 3.1 定量分析及仿真实验验证

##### 3.1.1 船只静止时

如图3(a)和图3(b)所示，当船只保持静止时，

无论船身朝向是距离向还是方位向，SAR成像效果都很好。散射点无散焦，船只整体的长度、宽度都保持不变，无任何失真。

##### 3.1.2 船只仅存在横滚时

假设船只横滚的幅度  $A_r$  为 0.06 rad，转动角频率  $\Omega_r$  为 0.628 rad/s，初相位  $\varphi_r$  为 0，此时船只左舷

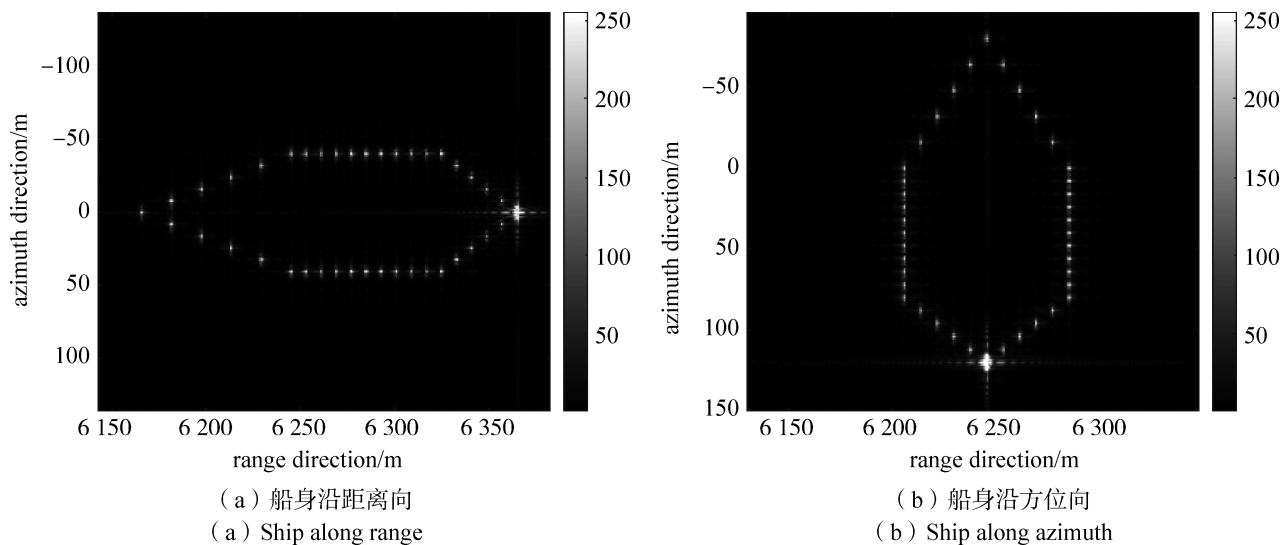


图3 船只静止时的SAR图像

Fig.3 SAR image when the ship is stationary

表 1 本文使用的主要参数

Table 1 Main parameters used in this paper

参数	数值	参数	数值
带宽 $B_r$	200 MHz	平台高度 $h$	5 km
脉冲宽度 $T_r$	1.5 $\mu$ s	场景中心斜距 $r$	8 km
脉冲重复频率 $f_{PRF}$	200 Hz	平台速度 $v$	100 m/s
方位向天线尺寸 $D$	1 m	波长 $\lambda$	0.031 25 m

部分上浮、右舷部分下沉。若船上散射点  $P$  的坐标为  $(10\text{ m}, -40\text{ m}, 2\text{ m})$ , 根据式 (23), 可得  $P$  点在图像上的方位向坐标为  $-35.36\text{ m}$ , 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点的方位向坐标为  $35.36\text{ m}$ 。通过选取更多的散射点计算可知, 在此种转动情况下, SAR 图像中船只整体在方位向被压缩。图 4(a) 显示了此时的仿真成像结果, 船只在距离向的长度没变, 而在方位向被压缩。如果转动初相位  $\varphi_r$  为  $\pi$ , 即船只左舷部分下沉、右舷部分上浮。计算表明:  $P$  点的方位向坐标为  $115.36\text{ m}$ , 而与  $P$  点关于  $X$  轴

对称的散射点方位向坐标为  $-115.36\text{ m}$ , 此时 SAR 图像中船只整体在方位向被展宽。图 4(b) 显示了此时的仿真成像结果, 船只在距离向的长度未发生变化, 而在方位向被展宽。

将图 4(a) 中方框内的区域放大, 红色方框内即为  $P$  点, 在方位向大约偏移至  $-35\text{ m}$ , 如图 4(c) 所示。蓝色方框内即为与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点, 在方位向大约偏移至  $35\text{ m}$ , 如图 4(d) 所示。

改变转动参数, 进一步验证公式推导的正确性。假设船只横滚的幅度  $A_r$  为  $0.08\text{ rad}$ , 转动角频率  $\Omega_r$  为  $0.314\text{ rad/s}$ , 初相位  $\varphi_r$  为  $0$ 。根据式 (23), 可得  $P$  点在图像上的方位向坐标为  $-10.24\text{ m}$ , 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点的方位向坐标为  $10.24\text{ m}$ 。图 4(e) 和图 4(f) 显示了仿真成像结果,  $P$  点在方位向大约偏移至  $-10\text{ m}$ , 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点在方位向大约偏移至  $10\text{ m}$ 。

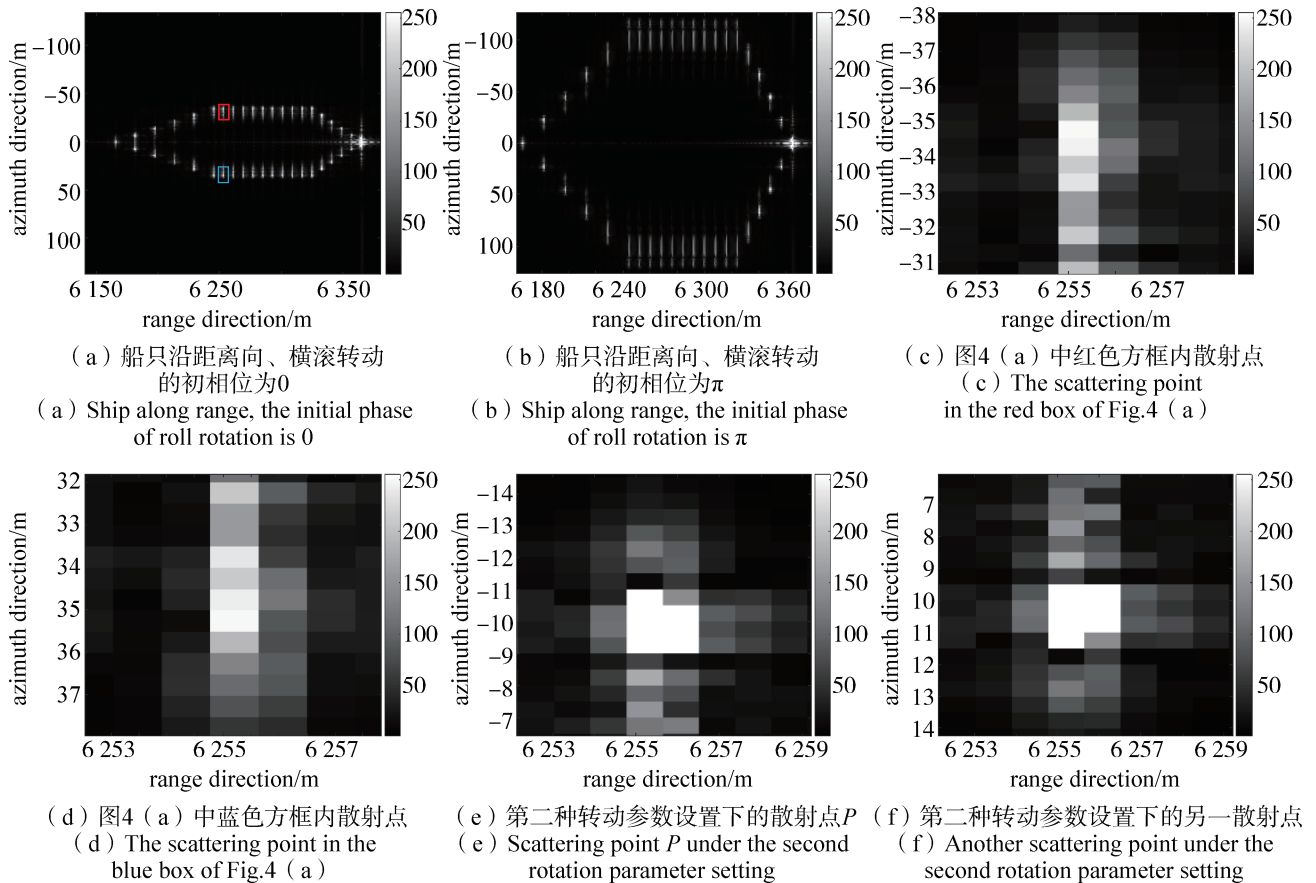


图 4 船只发生横滚时的 SAR 图像  
Fig.4 SAR image of ship rolling

### 3.1.3 船只仅存在俯仰时

假设船只俯仰的幅度  $A_p$  为 0.01 rad, 转动角频率  $\Omega_p$  为 0.785 rad/s, 初相位  $\varphi_p$  为 0, 此时船只前半部分下沉, 后半部分上浮。若散射点  $P$  的坐标为 (-16 m, -32 m, 2 m), 根据式(25), 可得  $P$  点在图像上的方位向坐标为 37.30 m, 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点的方位向坐标为 -26.70 m。通过选取更多的散射点计算可知, 在此种转动情况下, 船只整体宽度没有发生变化, 但是前半部分沿方位向的正方向发生偏移, 后半部分沿方位向的负方向发生偏移。如果转动初相位  $\varphi_p$  为  $\pi$ , 即船只前半部分上浮, 后半部分下沉。计算表明: 此时船只整体宽度没有发生变化, 但是前半部分沿方位向的负方向发生偏移, 后半部分沿方位向的正方向发生偏移。图 5(a)和图 5(b)显示了仿真成像结果, 与上述对船只形变的分析结果吻合。

将图 5(a)中方框内的区域放大, 红色方框内即为  $P$  点, 在方位向大约偏移至 37 m, 如图 5(c)所示。虚线方框内即为与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射

点, 在方位向大约偏移至 -26.50 m, 如图 5(d)所示。

假设船只俯仰的幅度  $A_p$  为 0.02 rad, 转动角频率  $\Omega_p$  为 0.628 rad/s, 初相位  $\varphi_p$  为 0。根据式(25),  $P$  点在图像上的方位向坐标为 40.48 m, 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点的方位向坐标为 -23.51 m。图 5(e)和图 5(f)显示了仿真成像结果,  $P$  点在方位向大约偏移至 40.50 m, 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点在方位向大约偏移至 -23.50 m。

### 3.1.4 船只仅存在偏航时

假设船只偏航的幅度  $A_y$  为 0.02 rad, 转动角频率  $\Omega_y$  为 0.523 rad/s, 初相位  $\varphi_y$  为 0, 此时船只往左偏航。若散射点  $P$  的坐标为 (20 m, -40 m, 2 m), 根据式(27),  $P$  点在图像上的方位向坐标为 13.74 m, 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点的方位向坐标为 -13.74 m。通过选取更多的散射点计算可知, 在此种转动情况下, 船只整体在方位向被压缩, 压缩程度与点  $P$  的  $X$  轴坐标有关,  $X$  轴坐标的绝对值越大, 压缩程度越严重。如果转动初相位  $\varphi_y$  为  $\pi$ , 即船只往右偏航。计算表明: 此时船只整体在方位

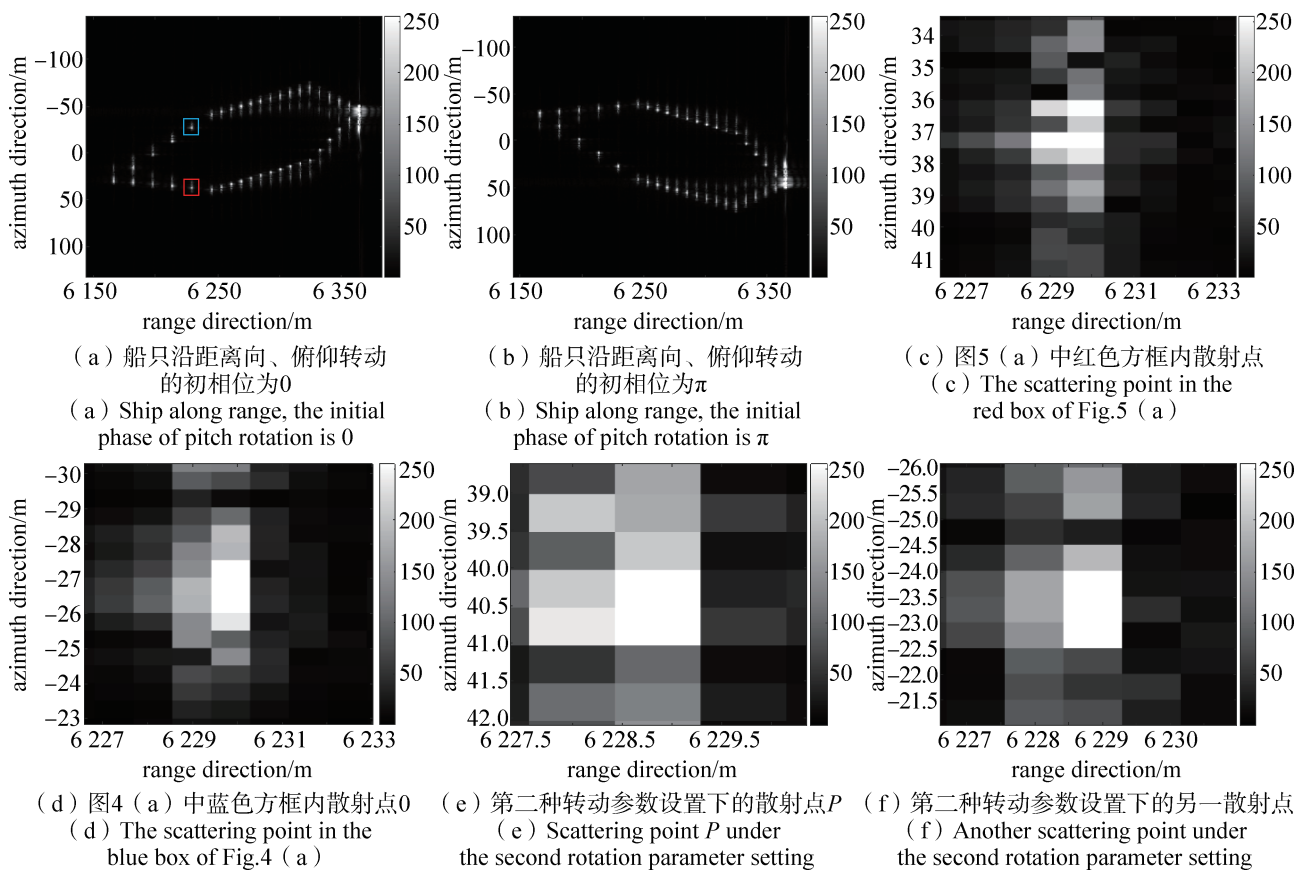


图 5 船只发生俯仰时的 SAR 图像  
Fig.5 SAR image of ship pitching



向被展宽, 展宽程度同样与点  $P$  的  $X$  轴坐标有关,  $X$  轴坐标的绝对值越大, 展宽程度越严重。图 6(a) 和图 6(b) 显示了仿真成像结果, 与上述对船只形变的分析结果吻合。

将图 6(a) 中方框内的区域放大, 红色方框内即为  $P$  点, 在方位向大约偏移至 14 m, 如图 6(c) 所示。蓝色方框内即为与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点, 在方位向大约偏移至 -14 m, 如图 6(d) 所示。

假设船只偏航的幅度  $A_y$  为 0.03 rad, 转动角频率  $\Omega_y$  为 0.628 rad/s, 初相位  $\varphi_y$  为 0。根据式 (27),  $P$  点在图像上的方位向坐标为 7.18 m, 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点的方位向坐标为 -7.18 m。图 6(e) 和图 6(f) 显示了仿真成像结果,  $P$  点在方位向大约偏移至 7 m, 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点在方位向大约偏移至 -7 m。

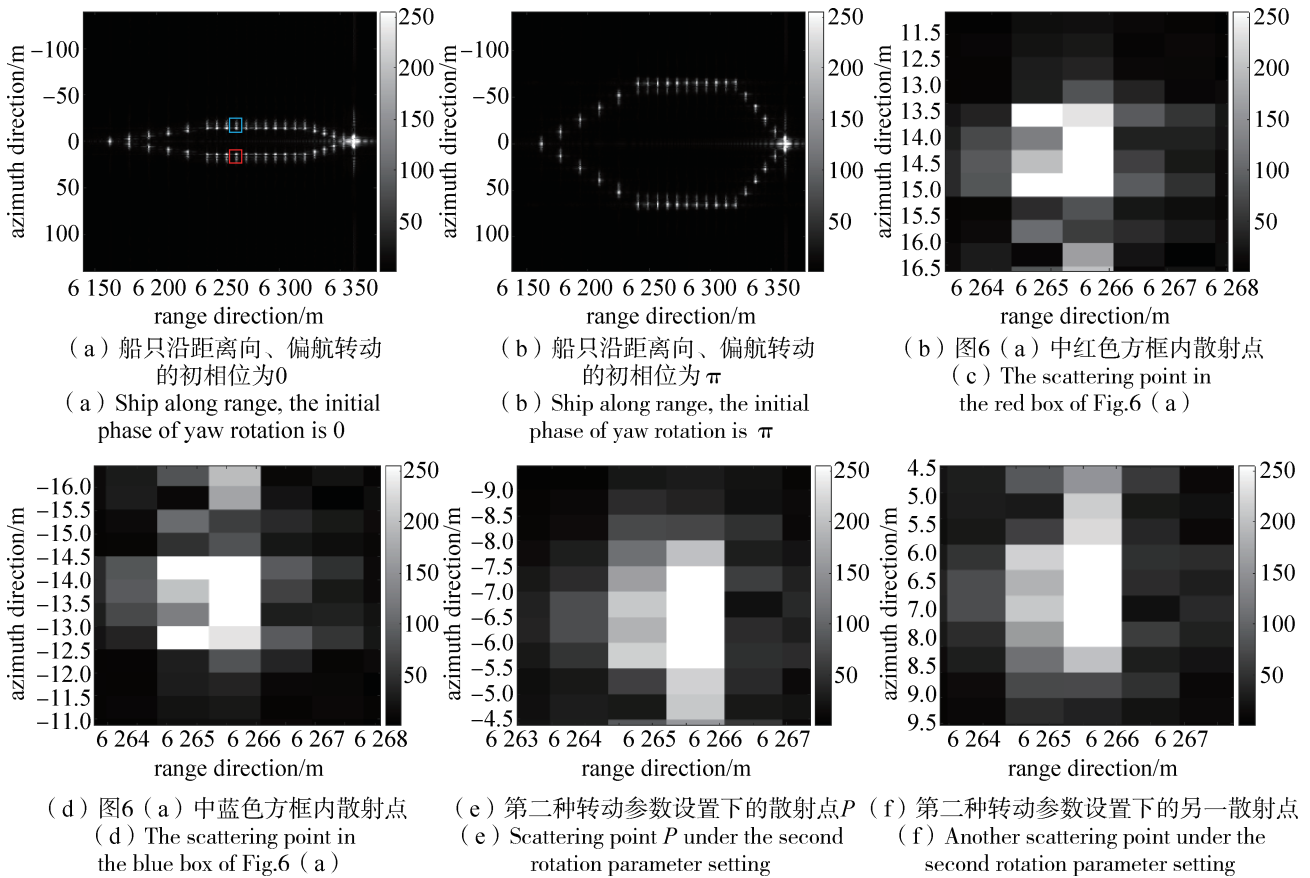


图 6 船只发生偏航时的 SAR 图像

Fig.6 SAR image of ship yawing

### 3.1.5 同时存在三维转动时

假设横滚幅度  $A_r=0.06$  rad, 角速度  $\Omega_r=0.628$  rad/s, 初相位  $\varphi_r$  为 0; 俯仰幅度  $A_p=0.01$  rad, 角速度  $\Omega_p=0.785$  rad/s, 初相位  $\varphi_p$  为  $\pi$ ; 偏航幅度  $A_y=0.02$  rad,  $\Omega_y=0.523$  rad/s, 初相位  $\varphi_y$  为  $\pi$ 。此时船只左舷上浮、右舷下沉, 前半部分上浮、后半部分下沉, 船头往右偏航。若船上散射点  $P$  的坐标为 (40 m, -40 m, 2 m), 根据式 (29),  $P$  点在图像上的方位向坐标为 7.45 m, 与  $P$  点关于  $X$  轴对称的散射点的方位向坐标为 25.93 m。通过选取更

多的散射点计算可知, 在此种转动的情况下, 船只整体在方位向被压缩, 船只的前半部分沿方位向的负方向偏移、后半部分沿方位向的正方向偏移。如果  $\varphi_r$ 、 $\varphi_p$ 、 $\varphi_y$  全都为 0, 即船只左舷上浮、右舷下沉, 前半部分下沉、后半部分上浮, 船头往左偏航。计算表明: 船只整体在方位向上被展宽, 船只的前半部分沿方位向的正方向偏移、后半部分沿方位向的负方向偏移。图 7(a) 和图 7(b) 显示了仿真成像结果, 与上述对船只形变的分析结果吻合。

将图7(a)中方框内的区域放大，红色方框内即为 $P$ 点，在方位向大约偏移至8 m，如图7(c)所示。蓝色方框内即为与点 $P$ 关于 $X$ 轴对称的散射点，在方位向大约偏移至25.50 m，如图7(d)所示。

假设横滚幅度 $A_r=0.05$  rad，角速度 $\Omega_r=0.523$  rad/s，初相位 $\varphi_r$ 为0；俯仰幅度 $A_p=0.03$  rad，角速度 $\Omega_p=0.628$  rad/s，初相位 $\varphi_p$ 为 $\pi$ ；偏航幅度 $A_y=0.01$  rad， $\Omega_y=0.785$  rad/s，初相位 $\varphi_y$ 为 $\pi$ 。根据式(29)， $P$ 点在图像上的方位向坐标为47.31 m，与 $P$ 点关于 $X$ 轴对称的散射点的方位向坐标为32.79 m。图7(e)和图7(f)显示了仿真成像

结果， $P$ 点在方位向大约偏移至46.5 m，与 $P$ 点关于 $X$ 轴对称的散射点在方位向大约偏移至32.5 m。

### 3.2 误差分析

表2列出了不同转动情况下的部分计算结果及其对应仿真结果，经过对比可以发现，计算结果与仿真结果相差最大不超过1 m。因此，本文所推导的表达式可以较准确地计算出方位向坐标。由于散射点散焦，所以在读取仿真图像中散射点的方位向位置时会存在偏差，这是计算结果与仿真结果间误差的主要来源。

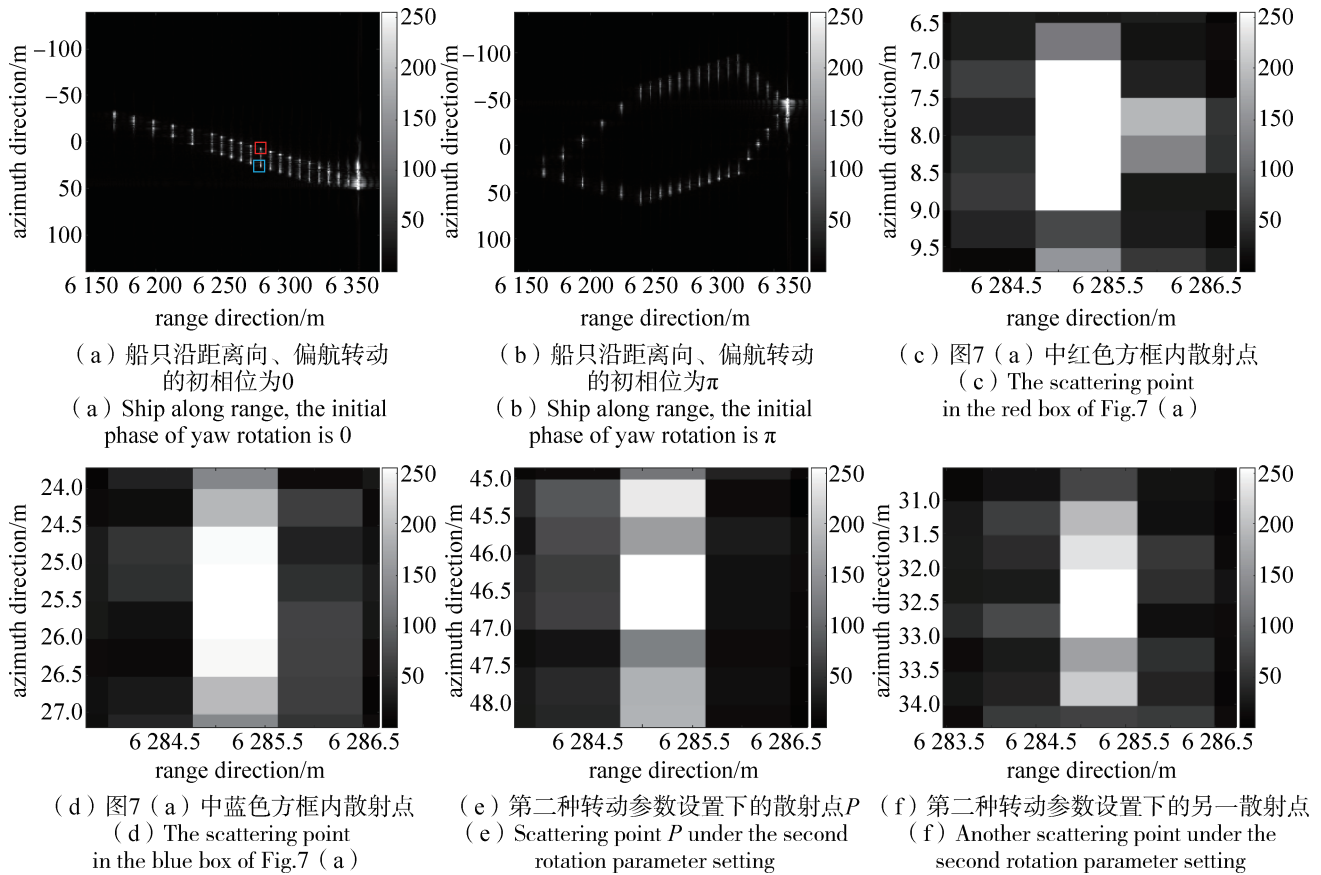


图7 船只三维转动同时存在时的SAR图像

Fig.7 SAR image of ship three-dimensional rotation

表2 不同转动情况下计算结果与仿真结果比较

Table 2 Comparison between calculation results and simulation results under different rotation conditions

转动情况	散射点坐标	计算结果	仿真结果	位置误差
横滚	(10 m, -40 m, 2 m)	-35.36 m	-35 m	0.36 m
俯仰	(-16 m, -32 m, 2 m)	37.30 m	37 m	-0.3 m
偏航	(20 m, -40 m, 2 m)	13.74 m	14 m	0.26 m
三维转动同时存在	(40 m, -40 m, 2 m)	7.45 m	8 m	0.55 m

## 4 结束语

本文建立了船只目标 SAR 成像的几何模型, 推导了船只受三维转动影响情况下的 SAR 图像二维时域表达式。经分析表明: 船只三维转动除了造成 SAR 图像中散射点散焦、出现鬼影等失真外, 还会导致方位向位置偏移。由于不同散射点的偏移量不同, 将会造成船只整体产生形变。此外, 还推导出了船只转动影响下的散射点在 SAR 图像中方位向坐标的表达式。通过多个示例, 详细分析了多种情况下 SAR 图像中散射点的偏移程度以及船只整体的形变情况。仿真实验的结果验证了所推导表达式的准确性和理论分析的正确性。

### 参考文献

- [1] 王玉莹, 张志敏, 李宁, 等. 高分宽幅 SAR 系统下的方位多通道运动目标成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 541-546.  
WANG Yuying, ZHANG Zhimin, LI Ning, et al. A moving target imaging approach for the multichannel in azimuth high resolution wide swath SAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(3): 541-546.
- [2] 张晰, 张杰, 孟俊敏. 基于旋翼无人机雷达的船只目标成像与类型识别研究进展综述[J]. 海洋科学, 2020, 44(6): 141-147.  
ZHANG Xi, ZHANG Jie, MENG Junmin. Review of ship target imaging and type recognition by unmanned rotorcraft-borne radar[J]. Marine Sciences, 2020, 44(6): 141-147.
- [3] 曹晔, 闫海鹏, 张剑琦, 等. 高动态条件下舰船目标 SAR 成像算法研究[J]. 遥测遥控, 2019, 40(4): 40-48.  
CAO Ye, YAN Haipeng, ZHANG Jianqi, et al. Research on ship target SAR imaging algorithm under high dynamic condition[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(4): 40-48.
- [4] ZHANG Lin, JIANG Yicheng. Imaging algorithm for sea-surface ship targets based on block sparsity[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2020, (2): 1-10.
- [5] 赵彬, 廖婉伶, 朱鑫, 等. 基于运动参数估计的中轨道星载 SAR 舰船成像算法研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 81-90.  
ZHAO Bin, LIAO Wanling, ZHU Xin, et al. Research on imaging algorithm of moving ship based on motion parameters estimation in MEO SAR[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 81-90.
- [6] YAO G, XIE J, HUANG W. HF radar ocean surface cross section for the case of floating platform incorporating a six-DOF oscillation motion model[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, (99): 1-16.
- [7] OUCHI K, IEHARA M, MORIMURA K, et al. Nonuniform azimuth image shift observed in the Radarsat images of ships in motion[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(10): 2188-2195.
- [8] 蔡彦宁, 种劲松. 舰船目标三维转动 SAR 成像仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 287-291, 364.  
CAI Yanning, CHONG Jinsong. SAR imaging simulation for three-dimensional rotations of ship targets[J]. Computer Simulation, 2011, 28(3): 287-291, 364.
- [9] LIU P, JIN Y Q. A study of ship rotation effects on SAR image[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2017, 55(6): 3132-3144.
- [10] ZHOU B, QI X, ZHANG J, et al. Effect of 6-DOF oscillation of ship target on SAR imaging[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1821.
- [11] 皮亦鸣, 杨建宇, 付毓生. 合成孔径雷达成像原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.
- [12] NEO Y L, WONG F, CUMMING I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 93-96.
- [13] 杨传安, 齐向阳, 李宁. 一种基于参数估计的运动舰船 SAR 成像方法[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(5): 30-36.  
YANG Chuan'an, QI Xiangyang, LI Ning. A method for moving ship SAR imaging based on parameter estimation[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(5): 30-36.
- [14] 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.  
LEI Jie, XING Mengdao, BAO Zheng. A method of ISAR ship imaging based on pendulum module[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(1): 1-6.
- [15] 吴晓芳, 刘阳, 王雪松, 等. 旋转微动目标的 SAR 成像特性分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1181-1189.  
WU Xiaofang, LIU Yang, WANG Xuesong, et al. Analysis of SAR imaging characteristics of targets with rotational micro-motion[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(4): 1181-1189.

## [作者简介]

周 鹏 1976年生，副教授，主要研究方向为SAR成像、ISAR成像和海洋遥感。

尹晓舜 1997年生，硕士研究生，主要研究方向为旋翼无人机SAR运动补偿和船只成像方法。

张 晰 1981年生，研究员，主要研究方向为海洋遥感和SAR成像处理。

张振华 1977年生，研究员，主要研究方向为SAR成像和雷达信号处理。

王 影 1979年生，研究员，主要研究方向为雷达信号处理和SAR系统。

张 杰 1979年生，教授，主要研究方向为SAR海洋动力环境探测技术、SAR海洋目标探测技术、高光谱遥感、高频地波雷达海洋探测技术和海洋遥感应用系统的集成。

(本文编辑：傅 杰)