

基于运动参数估计的中轨道星载 SAR 舰船成像算法研究*

赵 彬¹, 廖婉伶¹, 朱 鑫¹, 黄祖镇², 张 云^{✉1}

(1 哈尔滨工业大学电子工程系 哈尔滨 150001

2 中国电子科技集团第十四研究所 南京 210012)

摘要: 中轨合成孔径雷达具有非匀直运动轨迹的特点, 对非合作运动舰船目标成像时, 相对运动复杂, 成像困难。提出一种适用于中轨 SAR 海上运动舰船目标的高分辨成像算法, 首先分析中轨 SAR 的特性, 推导中轨 SAR 精确的斜距模型, 分析由运动舰船引起的回波相位误差, 结合斜距模型和多普勒参数估计推导舰船运动参数, 进而修正斜距模型, 根据修正后的斜距模型补偿舰船运动带来的误差, 获得清晰的运动舰船目标图像, 并通过实验仿真验证了所提算法能够有效改善成像效果, 得到聚焦良好的目标图像。

关键词: 中轨 SAR; 参数估计; 舰船目标; 斜距模型

中图分类号: V443+.2 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)02-0081-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210323001

引用格式: 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.

Research on imaging algorithm of moving ship based on motion parameters estimation in MEO SAR

ZHAO Bin¹, LIAO Wanling¹, ZHU Xin¹, HUANG Zuzhen², ZHANG Yun¹

(1. Dept. Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Nanjing 210012, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of Medium Orbit Synthetic Aperture Radar (MEO SAR) that the radar trajectory is non-straight and ship targets are not cooperative, this paper proposed a high-resolution imaging algorithm for moving ship under MEO SAR system. Firstly, the characteristics of MEO SAR are analyzed. The accurate slant range model of MEO SAR is derived, and the echo phase error caused by moving ships is analyzed. Combined with range model and Doppler parameter estimation to estimate ship motion parameters and then modify the range model. According to the modified range model, the error caused by ship motion is compensated to perform imaging of moving ship. Finally, it is verified by experimental simulation that good imaging results can be obtained within the range of common ship targets at sea.

Key words: MEO SAR; Parameter estimation; Ship target; Range model

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210323001

Citation: 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.

引 言

随着海洋经济的快速繁荣和海洋权益斗争形势的日趋严峻, 对广袤蓝色国土的有效监控, 已经成为关系国家利益和安全的重大战略问题。我国是一个拥有 300 多万平方千米海域、1.8 万千米海岸线的海

*基金项目: 国家自然科学基金(61201308)

✉通信作者: 张云(zhangyunhit@hit.edu.cn)

收稿日期: 2021-03-23 收修改稿日期: 2021-12-23

洋大国, 海洋的重要性不言而喻。对海监测是维护海上秩序和保障海洋安全的重要手段, 海上舰船是对海监测的重要目标, 合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 具有全天时、全天候并且可以远距离高分辨成像的特点, 对舰船目标的侦察具有重要意义。常规的机载 SAR 和低轨星载 SAR 已经广泛运用于舰船目标成像中, 但低轨 SAR 的覆盖范围和高分辨之间是互相矛盾的, 而且对同一地区的重访周期比较长, 单次过顶可观测时间较短, 很难实现目标的连续监测。

针对这些问题, 一种有效的解决方案是将 SAR 系统搭载在更高轨道的卫星上, Tomiyasu 等人提出了地球同步轨道合成孔径雷达 GEO SAR (Geosynchronous Synthetic Aperture Radar) 的概念, 分析了 GEO SAR 重访周期短, 覆盖范围广等优点^[1]。美国 GESS 研究小组在 2003 年发表的研究表明, 当卫星轨道高度超过 10 000 km 时, 仅靠提升卫星轨道高度来增加 SAR 的覆盖范围意义不大。德国宇航局的 Jalal Matar 在 2016 年讨论了中轨 SAR 的轨道设计以及相应的覆盖范围, 分析了 SAR 的性能随轨道高度增加而发生的变化, 提出了采用重访周期仅为三天且几乎覆盖全球范围的轨道^[2]。2018 年, Jalal Matar 又给出了中轨 SAR 系统技术方面所面临的挑战^[3], 描述了中轨 SAR 的宽覆盖和高时间分辨率的特点, 发展中轨道 SAR 的干涉和极化具有广泛的应用价值。众所周知, 当 SAR 载荷位于轨道比较高的情况下, 合成孔径时间会大大增加, 合成孔径时间内一些非合作运动目标的成像遇到困难, 有效积累时间内目标的运动导致 SAR 成像严重散焦甚至无法成像。作为低轨 SAR 和 GEO SAR 的折中, 中轨 SAR 结合二者的优点, 实现广域监测的同时还能极大缩短重访周期, 合成孔径时间也能根据发射信号的频段选择控制在百秒以内, 这对舰船目标的成像是有利的。因此, 研究中轨 SAR 系统下的舰船目标成像方法是未来对海监测的迫切需求。

目前, 对舰船的成像大都是选择舰船目标所在距离单元的数据进行参数估计, 将方向向回波视为二阶的线性调频信号处理, 估计出回波的多普勒频率和多普勒调频率, 然后进行补偿。在中轨 SAR 的情况下, 长积累时间下卫星轨道的曲率和远距离下雷达平台的非“走-停”问题不能忽略, 传统的二阶斜距模型不再适用, 因此需要对运动舰船的成像方法进行一定的改进。本文先从中轨 SAR 的斜距模型入手, 分析不同发射信号载频下的合成孔径时间和对应不同斜距模型的相位误差, 选择合适的成像斜距模型, 分析舰船不同的运动状态引起的回波相位误差; 然后根据斜距模型分析给出基于多普勒参数估计的舰船二维速度估计的方法, 并提出一种基于二维速度估计的运动舰船成像的方法; 最后用实验仿真验证了本文所提方法的有效性。

1 中轨 SAR 成像几何构型及成像特性分析

1.1 中轨星载 SAR 几何模型

中轨 SAR 是一种将 SAR 雷达载荷放置在中轨道卫星上的主动式遥感雷达, 卫星的轨道特性会直接影响 SAR 回波的多普勒特性, 分析其几何构型是研究成像机理的基础。本文研究中轨星载 SAR 的几何关系, 主要在卫星局部坐标系、地心直角坐标系和地面局部直角坐标系中描述。其中卫星局部坐标系用于分析卫星姿态和雷达天线指向等问题, 地心直角坐标系用于描述卫星相对于地球运动关系, 地面局部直角坐标系用来描述地面成像平面。地心直角坐标系和地面局部直角坐标系的转换关系如图 1 所示, 其中 O 表示地心, 地心直角坐标系以 O 为原点, 格林尼治子午线为 X_0 轴, 在赤道平面内垂直于 X_0 轴的为 Y_0 轴, Z_0 轴满足右手定则。 S 表示卫星, P 点表示地面参考点, 一般选取为雷达天线的波束中心点。

在地面局部直角坐标系中, P 为坐标原点, \overline{OP} 方向为 Z 轴, 用于描述高度, 在 OPS 平面内, 点 P

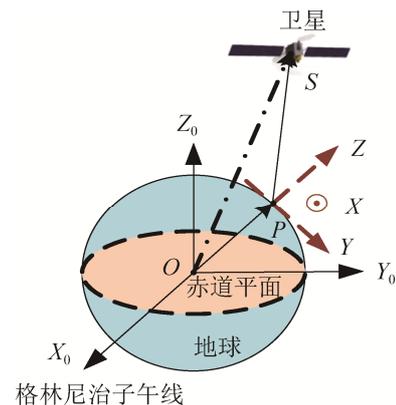


图 1 中轨 SAR 几何模型

Fig. 1 Geometric model of MEO SAR

处的切线方向为 Y 轴, X 轴满足右手定则。在 $O-X_0Y_0Z_0$ 坐标系中, 各点的坐标在文献[4]中有详细的介绍。下面给出 $P-XYZ$ 坐标系的方向向量在 $O-X_0Y_0Z_0$ 中的表达式。

$$\begin{cases} \mathbf{z} = \overline{OP} / |\overline{OP}| \\ \mathbf{y} = -(\overline{OS} - \overline{OS} \cdot \mathbf{z}) / |\overline{OS} - \overline{OS} \cdot \mathbf{z}| \\ \mathbf{x} = (\mathbf{z} \times \mathbf{y}) / |\mathbf{z} \times \mathbf{y}| \end{cases} \quad (1)$$

从地心坐标系到地面局部直角坐标系的转换矩阵为 $\mathbf{T} = [\mathbf{x}^T; \mathbf{y}^T; \mathbf{z}^T]$, 在地面参考点 P 选定之后, 将各点在 $O-X_0Y_0Z_0$ 下的坐标沿着三个轴进行投影便可得到在 $P-XYZ$ 坐标系下的坐标。坐标转换之后, 可以将中轨 SAR 模型用航向、距离向以及高度等有具体物理意义的维度来描述, 后续内容的分析均在地面局部直角坐标系下进行。

1.2 斜距模型分析

低轨卫星运行的角速度比较大, 转过 $\Delta\theta$ 需要的时间比较短, 合成孔径时间比较短, 在合成孔径时间内运行的轨迹可以近似等效为直线, 回波斜距模型采用直线斜距模型即可。中高轨 SAR 的合成孔径时间比较长, 轨道的曲率问题不能忽略, 需要考虑高阶斜距模型。将目标到雷达的瞬时斜距 R 在孔径中心时刻 t_c 处进行四阶泰勒展开, 即

$$R(t_a) = k_0 + k_1(t_a - t_c) + k_2(t_a - t_c)^2 + k_3(t_a - t_c)^3 + k_4(t_a - t_c)^4 \quad (2)$$

上式中, k_0 表示中心参考斜距, t_a 表示方位向时间。假设参考点处的斜距矢量为 \mathbf{R}_0 , 速度为 \mathbf{V}_0 , 加速度为 \mathbf{A}_0 , 二、三阶加速度分别为 \mathbf{B}_0 、 \mathbf{C}_0 。定义 $\alpha_0 \sim \alpha_4$ 为

$$\begin{cases} \alpha_0 = \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_0; \alpha_1 = \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{V}_0; \alpha_2 = \mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{V}_0 + \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{R}_0 \\ \alpha_3 = \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{R}_0 + 3\mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{V}_0; \alpha_4 = 3\mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{A}_0 + \mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{R}_0 + 4\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{V}_0 \end{cases} \quad (3)$$

则高阶斜距展开的系数分别为

$$\begin{cases} k_0 = \frac{\alpha_0}{k_0}; k_1 = \frac{\alpha_1}{k_0}; k_2 = \frac{\alpha_2 - k_1^2}{2k_0} \\ k_3 = \frac{\alpha_3}{6k_0} + \frac{k_1^3 - k_1\alpha_2}{2k_0^2}; k_4 = \frac{\alpha_4}{24k_0} - \frac{k_2^2 + 2k_1k_3}{2k_0} \end{cases} \quad (4)$$

斜距模型的阶数越高, 回波信号的频谱推导越复杂, 计算量也会变大, 因此需要从系统设计的角度去选择合适的斜距模型。SAR 的距离向高分辨主要靠发射大时宽带宽信号(一般为线性调频信号)实现, 方位向的高分辨依赖于雷达天线照射目标时间内的相干积累实现。由于卫星相对于地心运行的轨迹为曲线, 方位分辨率 ρ_a 由雷达发射信号波长 λ 和在雷达天线照射目标的时间内雷达相对目标转过的角度 $\Delta\theta$ 来表示, 即 $\rho_a = \lambda/2\Delta\theta$ 。合成孔径时间为卫星转过角度 $\Delta\theta$ 所需要的时间, 文献[4]利用级数展开的方法, 给出了曲线轨迹 SAR 的合成孔径时间的数值解析式。

假设卫星轨道高度为 8 000 km, 轨道倾角为 15° , 轨道偏心率为 0.001, 系统设计的方位分辨率为 2 m, 雷达发射信号载频 5.2 GHz (C 波段)。根据文献[5]中的方法解出的合成孔径时间随卫星轨道位置的变化如图 2 所示, 在远地点处, 卫星相对于地球运动的速度最小, 合成孔径时间最长, 为 32.57 s; 在近地点处, 卫星相对于地球运动的速度最大, 合成孔径时间最小, 为 32.14 s。合成孔径时间随着卫星位置的变化是由于轨道的偏心率造成的, 在远地点处合成孔径时间最长, 因此选择远地点来分析斜距模型的适用性, 当斜距模型与真实斜距模型之间的相位误差大于 $\pi/4$ 时, 斜距误差会对成像造成影响。图 3 为在合成孔径时间里不同近似斜距模型引起的相位误差, 二阶斜距模型的最大相位误差已经超过了 $\pi/4$, 三阶斜距模型和四阶模型的最大相位误差都远小于 $\pi/4$, 四阶模型具有更大的计算量, 因此在满足成像要求的前提下, 优先考虑三阶斜距模型。

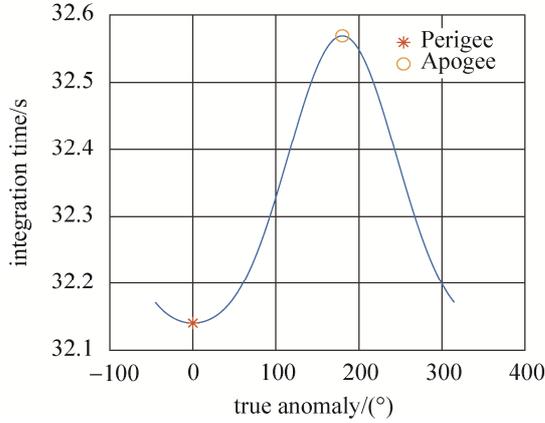


图 2 合成孔径时间
Fig. 2 Integration time

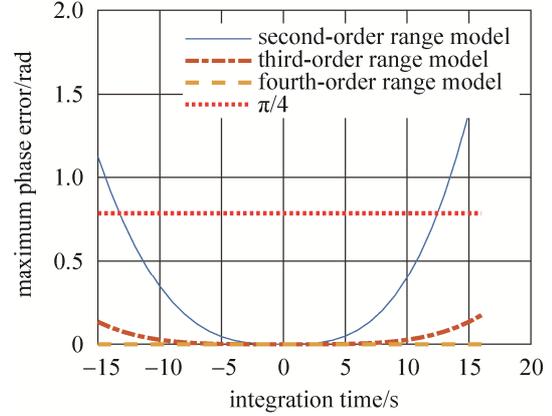


图 3 不同斜距模型的相位误差
Fig. 3 Phase error of different range models

在中轨 SAR 系统中, 由于回波时延增大, “走-停”假设会引入额外的相位误差。为了使斜距模型表达式具有一致性, 文献[6]推导出了斜距系数误差的表达式。

$$\Delta k_0 = \alpha_1/c; \Delta k_1 = \alpha_2/c; \Delta k_2 = \alpha_3/2c; \Delta k_3 = \alpha_4/6c \quad (5)$$

$$R_{TR}(t_a) = 2k_0 + \Delta k_0 + (2k_1 + \Delta k_1)t_a + (2k_2 + \Delta k_2)t_a^2 + (2k_3 + \Delta k_3)t_a^3 \quad (6)$$

式中 c 表示光速, 通过以上分析, 中轨 SAR 的回波信号可以表示为

$$S(t_r, t_a) = w_r(t_r - \tau)w_a(t_a - t_c)\exp\{j2\pi f_0(t - \tau) + j\pi K_r \tau^2\} \quad (7)$$

其中, t_r 表示快时间, f_0 为发射信号载频, K_r 为发射信号调频斜率, 斜距引起的回波时延 τ 为 $R_{TR}(t_a)/c$ 。高阶斜距模型表示的回波模型, 无法利用驻定相位原理去求解回波二维频谱, 采用级数反演法 MSR (the Method of Series Reversion) 可以近似得到回波的二维频谱^[7], 对二维频谱进行分离可以得到方位压缩项 X_0 、距离徙动项 X_1 、距离压缩项 X_2 、三次耦合项 X_3 , 在成像处理时, 对各阶相位项需要进行补偿, 式 (8)~式 (9) 给出具体表达式。

令

$$\begin{cases} p_0 = \frac{k_1^2}{k_2} + \frac{k_1^2 k_3}{2k_2^3}; p_1 = -\frac{k_1}{k_2} - \frac{3k_1^2 k_3}{4k_2^3} \\ p_2 = \frac{1}{4k_2} + \frac{3k_1 k_3}{8k_2^3}; p_3 = -\frac{k_3}{16k_2^3} \end{cases} \quad (8)$$

进一步, 二维频谱的各相位项表示为

$$\begin{cases} X_0 = \pi(-p_1 f_a + \lambda p_2 f_a^2 - \lambda^2 p_3 f_a^3); X_1 = \pi\left(\frac{p_0}{\lambda} - \lambda p_2 f_a^2 + 2\lambda^2 p_3 f_a^3\right)\frac{f_r}{f_0} - \pi\frac{4R_0}{c}f_r \\ X_2 = \pi(\lambda p_2 f_a^2 - 3\lambda^2 p_3 f_a^3)\frac{f_r^2}{f_0^2} - \pi\frac{f_r^2}{K_r}; X_3 = \pi(-\lambda p_2 f_a^2 + 4\lambda^2 p_3 f_a^3)\frac{f_r^3}{f_0^3} \end{cases} \quad (9)$$

式中 f_r 为距离维频率, f_a 为方位维频率, λ 为信号波长。

1.3 舰船运动对回波相位的影响

假设舰船运动的速度矢量为 $V_p = [v_{px}, v_{py}, v_{pz}]^T$, 雷达运动的速度矢量为 $V_0 = [v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}]^T$ 。将式 (3) 中的 V_0 改为 $V_0 - V_p$ 并带入式 (3) 中和式 (4) 中可以得到舰船运动情况下回波历程的斜距系数 k'_1 、 k'_2 、 k'_3 。图 4~图 6 为舰船切向速度 v_{px} (X 轴方向) 从 -30 m/s 到 30 m/s 变化和 Y 轴方向速度 v_{py} 从 -30 m/s 到 30 m/s 变化时, 在合成孔径时间内引起的各阶相位误差。

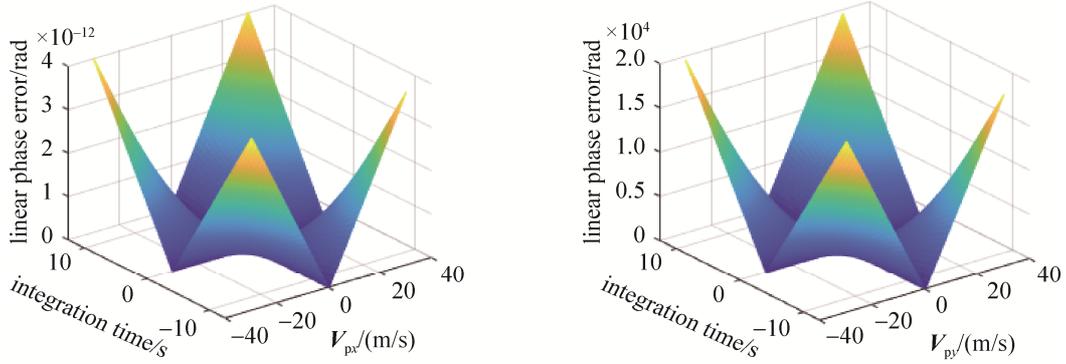


图 4 舰船运动引起的线性相位误差

Fig. 4 Linear phase error caused by ship motion

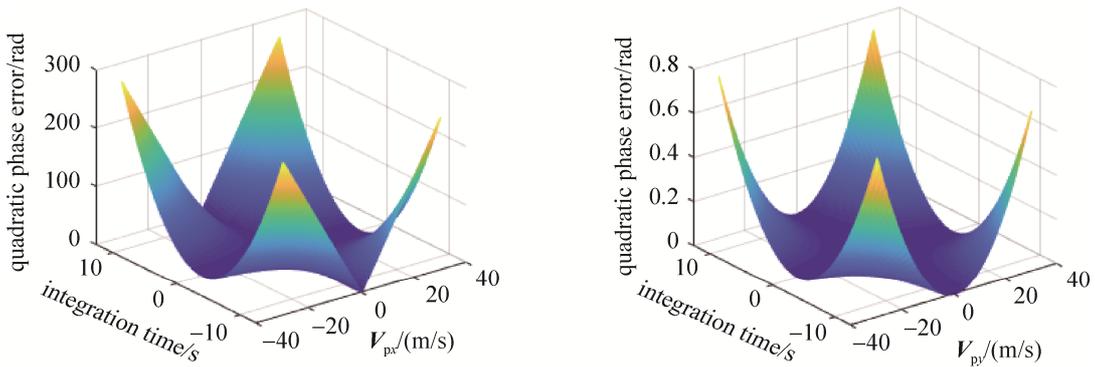


图 5 舰船运动引起的二次相位误差

Fig. 5 Quadratic phase error caused by ship motion

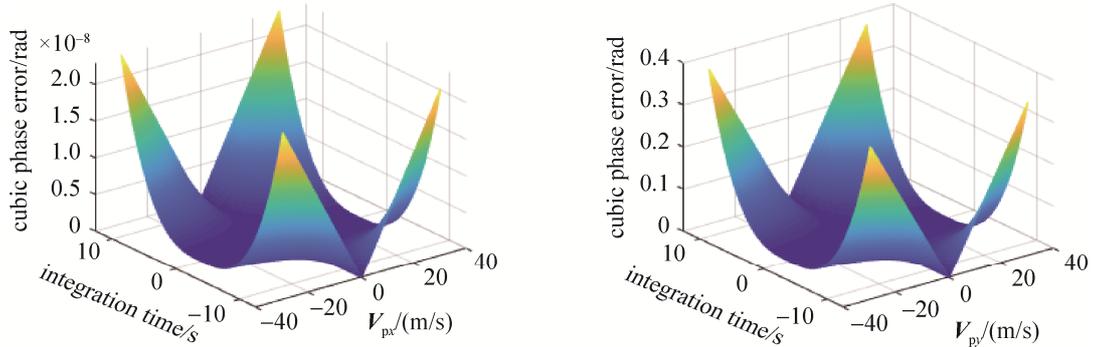


图 6 舰船运动引起的三次相位误差

Fig. 6 Cubic phase error caused by ship motion

从上面仿真的结果可以看出, X 方向的速度主要影响二阶相位, 线性相位误差和三阶相位误差均小于 $\pi/4$; Y 方向的速度主要影响一阶相位, 对二阶相位和三阶相位的影响虽然比较小, 但二阶相位误差大于 $\pi/4$, 在成像处理时不能忽略, 三阶相位也与 $\pi/4$ 在同一个数量级, 合成孔径时间比较长的情况下也必须考虑。

2 基于二维速度估计的舰船目标成像

2.1 二维速度估计

在 1.3 节的分析中, 舰船 X 方向的速度和 Y 方向的速度都会对回波相位造成很大的影响, 当相位误差不能忽略时, 会使成像结果散焦, 严重时甚至不能成像, 要想获得高分辨的舰船图像, 就必须从回波信号中准确估计出舰船的运动参数。

舰船有 v_x 和 v_y 两个未知的运动参数, 需要两个方程来求解, 利用多普勒中心 f_{DC} 和多普勒调频率 f_{DR}

两个参数, 对多普勒相位分别求一阶导数和二阶导数可得

$$\begin{cases} f_{\text{DC}} = -\frac{1}{2\pi} \frac{2\pi \times dR_{\text{TR}}(t_a)}{\lambda dt_a} \Big|_{t_a=0} = -\frac{2k_1 + \Delta k_1}{\lambda} \\ f_{\text{DR}} = -\frac{1}{2\pi} \frac{2\pi \times d^2 R_{\text{TR}}(t_a)}{\lambda dt_a^2} \Big|_{t_a=0} = -\frac{2(2k_2 + \Delta k_2)}{\lambda} \end{cases} \quad (10)$$

估计出回波的多普勒中心频率 f'_{DC} , 与 f_{DC} 作差得到 Δf_{DC} , 再将卫星和舰船的运动矢量代入式 (10) 有

$$\Delta f_{\text{DC}} = -\frac{2(k'_1 - k_1)}{\lambda} = \frac{2\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{V}_p}{\lambda k_0} = \frac{2r_{0x}v_{px}}{\lambda k_0} + \frac{2r_{0y}v_{py}}{\lambda k_0} + \frac{2r_{0z}v_{pz}}{\lambda k_0} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{R}_0 = [r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}]^T$ 为参考点到雷达的斜距矢量, 不考虑舰船的上下运动分量 v_{pz} , 根据图 4 的仿真结果表明, X 方向的速度对线性相位的影响比较小, 可以忽略。不考虑上式第一项和第三项的影响, 解得 Y 方向的速度 \hat{v}_{py} 为

$$\hat{v}_{py} = \frac{\Delta f_{\text{DC}} \lambda k_0}{2r_{0y}} \quad (12)$$

运动舰船的多普勒调频率 f'_{DR} 为

$$\begin{aligned} f'_{\text{DR}} &= -\frac{2(2k'_2 + \Delta k_2)}{\lambda} = -\frac{2(\mathbf{V}_0 - \mathbf{V}_p) \cdot (\mathbf{V}_0 - \mathbf{V}_p) + 2\mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{R}_0 - 2k_1^2}{\lambda k_0} - \frac{2\Delta k_2}{\lambda} \\ &= -\frac{2\left((v_{0x} - v_{px})^2 + (v_{0y} - v_{py})^2 + v_{0z}^2\right) + 2\mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{R}_0 - 2k_1^2 + 2k_0\Delta k_2}{\lambda k_0} \end{aligned} \quad (13)$$

解得 X 方向的速度 \hat{v}_{px} 为

$$\hat{v}_{px} = v_{0x} - \sqrt{\frac{-\lambda k_0 f'_{\text{DR}} - 2\mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{R}_0 + 2k_1^2 - 2k_0\Delta k_2}{2} - \left((v_{0y} - \hat{v}_{py})^2 + v_{0z}^2\right)} \quad (14)$$

通过上述过程, 结合星载 SAR 精确的惯导数据与回波的多普勒参数估计, 便可以解出舰船的二维速度。

舰船速度估计依赖于多普勒参数, 常用的多普勒中心频率估计的方法有频域峰值法、频域能量均衡法和相关函数法等。运动目标回波信号的方位谱展宽, 使用频域峰值法的估计精度较差, 而使用频域能量均衡法和相关函数法估计精度相对要好些。多普勒调频率估计采用鲁棒性强的方法如最小熵法, 该算法较为稳健, 参数估计精度高。本文采用相关函数法和最小熵法分别估计多普勒中心频率和调频率, 进一步估计二维速度 \hat{v}_{py} 和 \hat{v}_{px} , 估计的舰船运动矢量为 $\hat{\mathbf{V}}_p = [\hat{v}_{px}, \hat{v}_{py}, 0]^T$, 将式 (3) 中的 \mathbf{V}_0 改为 $\mathbf{V}_0 - \mathbf{V}_p + \hat{\mathbf{V}}_p$, 分析修正的斜距模型在合成孔径时间内的各阶相位误差, 各阶误差结果如图 7~图 9 所示。

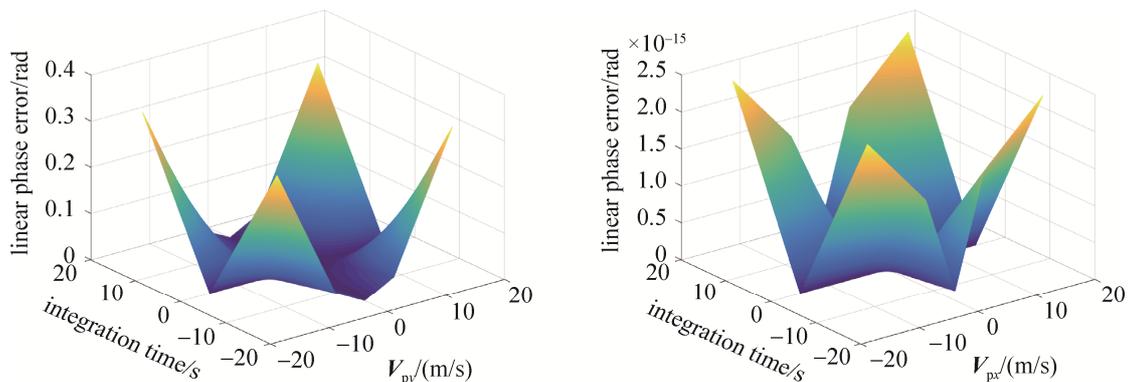


图 7 线性相位误差

Fig. 7 Linear phase error

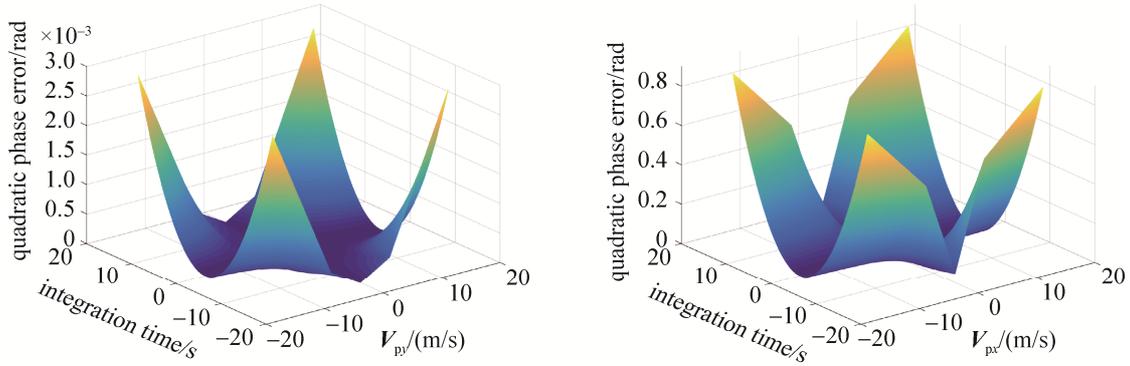


图 8 二次相位误差
Fig. 8 Quadratic phase error

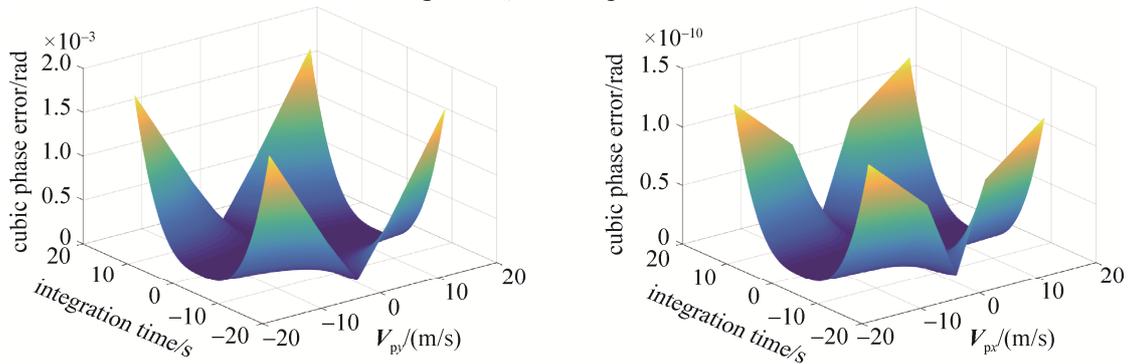


图 9 三次相位误差
Fig. 9 Cubic phase error

修正后斜距模型的误差来源于速度估计，而速度估计的精度取决于多普勒参数估计的精度，仿真的结果证明采用相关函数法和最小熵法估计多普勒参数精度已经足够，从仿真的结果可以看出，估计的二维速度精度较高，通过速度修正后斜距模型的相位误差降低，各阶相位误差均小于 $\pi/4$ ，满足成像要求。

2.2 舰船目标成像算法

利用 2.1 中的方法将舰船的运动参数估计出来，可以得到舰船的速度矢量，利用速度矢量去修正斜距展开系数，采用修正后的斜距系数重新处理回波数据，完成运动舰船的聚焦。图 10 给出了基于速度估计的舰船目标成像方法流程图。

具体算法步骤如下：

- ① 对原始回波数据进行距离压缩，通过卫星惯导数据 R_0, V_0, A_0, B_0, C_0 得到初始斜距系数 $k_0 \sim k_3$ 和“走-停”斜距误差系数 $\Delta k_0 \sim \Delta k_3$ ；
- ② 将数据变换到二维频域，利用 $k_0 \sim k_3$ 和 $\Delta k_0 \sim \Delta k_3$ 计算初始的相位耦合项 X_1, X_2 和 X_3 ，进行距离徙动校正、二次距离压缩和三次相位去耦合，将数据变换到二维时域，完成数据距离维的粗处理；
- ③ 选择舰船目标所在区域的数据，利用相关函数法估计回波数据的多普勒中心频率 f'_{DC} ，计算其与 f_{DC} 的差值 Δf_{DC} ，根据式 (12) 估计出 Y 方向的速度 \hat{v}_{py} ；
- ④ 利用最小熵法（或其他鲁棒性强的方法）估计所选数据的调频率 f'_{DR} ，由式 (14) 估计出 X 方向的速

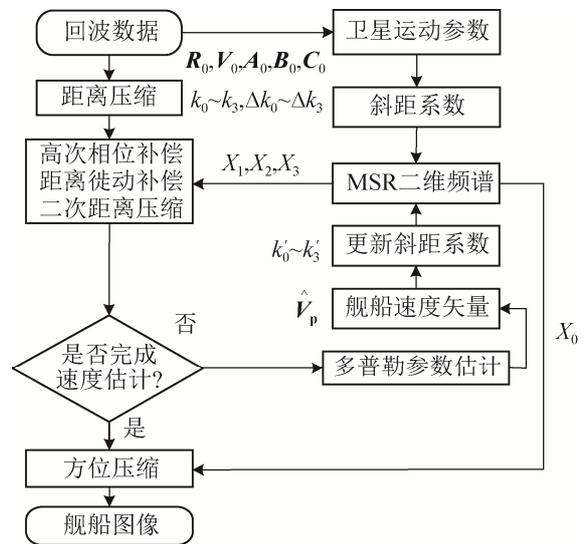


图 10 中轨 SAR 运动舰船成像流程图
Fig. 10 Flow chart of moving ship imaging for MEO SAR

度 \hat{v}_{px} , 舰船的运动矢量可以表示为 $\hat{V}_p = [\hat{v}_{px}, \hat{v}_{py}, 0]^T$;

⑤ 将①中的 V_0 更新为 $V_0 - \hat{V}_p$, 重新进行步骤①和②, 完成数据距离维的精处理;

⑥ 计算方位压缩项 X_0 , 将数据变换到方位时域, 补偿方位压缩项后换到二维时域, 便可得到聚焦的运动舰船图像。

2.3 仿真结果与分析

海上舰船目标一般尺寸比较小, 为了后续对舰船目标的分类与识别, SAR 图像的分辨率要尽可能高, L 波段多用于海洋监测和环境监测等领域, X 波段多用于高分辨成像, 但在星载 SAR 系统中 X 波段的实现难度比较大, 因此选择二者折中的 C 波段用于舰船目标成像比较合适。为了验证所提方法的可行性, 本文在 C 波段情况下进行了中轨 SAR 运动舰船目标成像的实验仿真, 中轨 SAR 具体的轨道参数以及雷达系统参数见表 1。

在轨道存在偏心率的情况下, 在远地点卫星的运行速度最小, 合成孔径时间最长, 本文的仿真假设卫星经过远地点。

假设舰船目标在合成孔径时间内为匀速直线运动, 海上舰船的运动速度大小一般都在 30 节之内, 本文仿真的舰船运动速度也在这一范围内变化。具体的仿真参数见表 2, 其中速度的负号表示与坐标轴的正方向相反。对仿真的回波数据采用本文提到的方法进行运动参数估计结果也在表 2 中列出。

从表 2 来看, 在海上舰船目标常用的速度范围内, 大多数情况下, 本文所提的方法都能比较准确地估计出舰船目标的二维运动参数, 第 13 组和 15 组的 Y 轴方向速度估计结果误差比较大, 第 16 组 X 轴速度估计结果误差比较大。通过仿真发现, 在对回波进行参数估计时估计误差与选取的回波数据有关, 本次仿真所有组选取数据的方式均一致, 因此会出现少量估计误差比较大的组。

利用估计出来的速度重新计算斜距系数, 对回波数据做精确的距离维处理和方位压缩。本文选用上述的第 4、7、13、16 组数据进行重新聚焦处理, 得到的对比结果如图 11~14 所示。

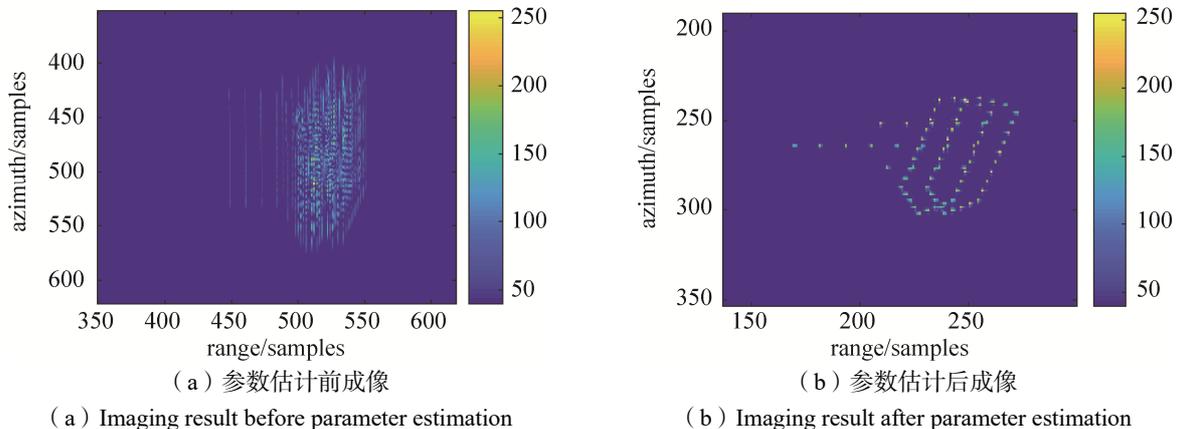


图 11 第 4 组成像结果对比

Fig. 11 Comparison of the 4th imaging results

表 1 中轨 SAR 系统参数

轨道参数	参数值	雷达参数	参数值
轨道高度	8 000 km	载频	5.2 GHz
偏心率	0.001	下视角	12°
轨道倾角	15°	天线孔径	4 m
近地点幅角	90°	脉冲重复频率	1 000 Hz
升交点赤经	105°	发射信号带宽	180 MHz
轨道起始时刻	0	脉冲宽度	5 μs

表 2 运动舰船运动参数估计结果

序号	X 轴方向速度 v_{px}		Y 轴方向速度 v_{py}	
	真实值 (m/s)	估计值 (m/s)	真实值 (m/s)	估计值 (m/s)
1	-5.00	-4.98	-5	-4.95
2	-5.00	-5.02	0.00	0.00
3	-5.00	-5.01	5.00	4.95
4	-5.00	-4.91	15.00	15.09
5	0.00	0.00	-5.00	-5.00
6	0.00	0.00	0.00	0.02
7	0.00	0.00	5.00	5.00
8	0.00	-0.01	15.00	14.97
9	5.00	5.01	-5.00	-5.05
10	5.00	5.00	0.00	0.00
11	5.00	5.02	5.00	5.05
12	5.00	4.91	15.00	14.97
13	15.00	15.04	-5.00	-4.79
14	15.00	15.05	0.00	0.00
15	15.00	15.02	5.00	4.79
16	15.00	14.78	15.00	15.06

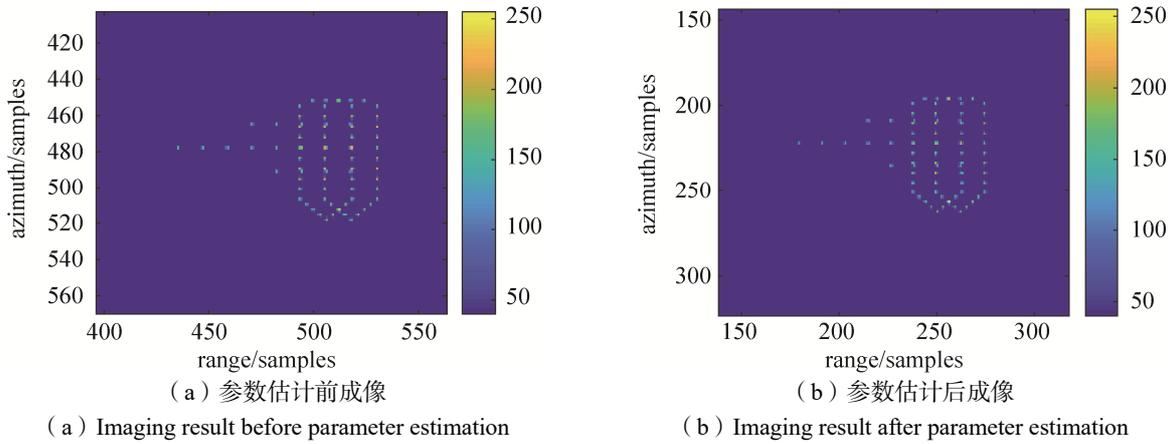


图 12 第 7 组成像结果对比

Fig. 12 Comparison of the 7th imaging results

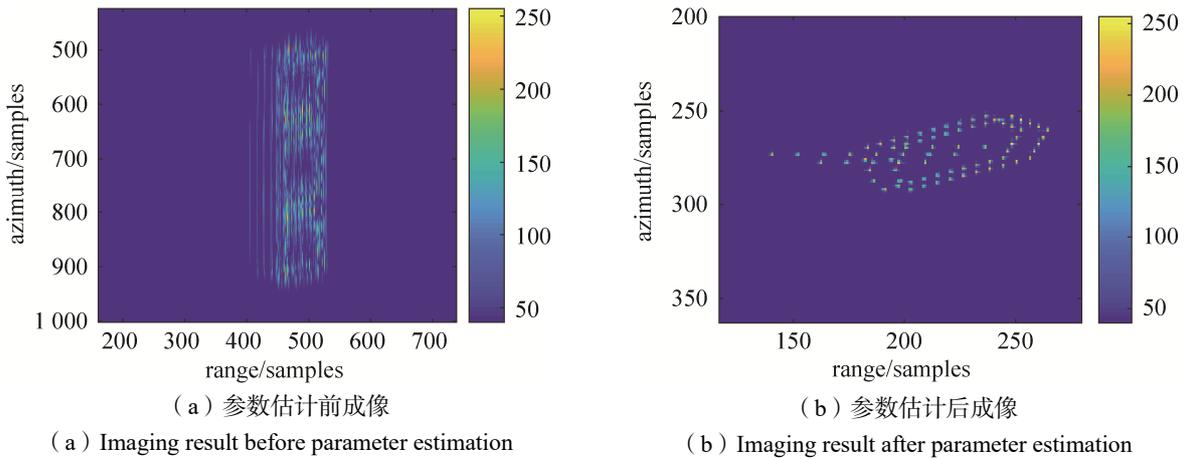


图 13 第 13 组成像结果对比

Fig. 13 Comparison of the 13th imaging results

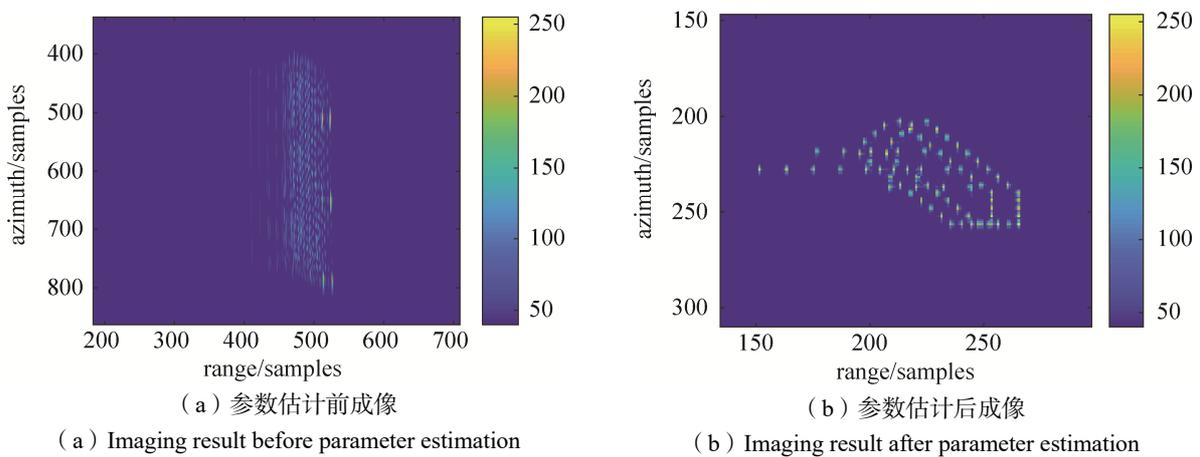


图 14 第 16 组成像结果对比

Fig. 14 Comparison of the 16th imaging results

图 11 中 v_{px} 为 -5 m/s , v_{py} 为 15 m/s , 图 11 (a) 为未进行速度估计的成像结果, 方位向严重散焦, 进行速度估计并补偿后, 可获得舰船目标重新聚焦图像, 如图 11 (b) 所示; 图 12 中 v_{px} 为 0 , v_{py} 为 5 m/s , 对比图 12 (a) 和图 12 (b), 由于存在径向速度使得成像位置发生了偏移; 图 13 中 v_{px} 为 15 m/s , v_{py} 为 -5 m/s , 图 13 (a) 中散焦严重, 经过速度估计和补偿之后图 13 (b) 重新聚焦; 图 14 中 v_{px} 为 15 m/s ,

v_{py} 为 15 m/s, 图 14 (a) 中散焦比前几组更加严重, 经过速度估计和补偿后聚焦性能有很大改善。

仿真结果说明, 通过估计出的速度矢量修正斜距系数来进行运动舰船目标成像具备可行性, Y 轴方向速度对二次相位和三次相位误差的影响比较小, 对目标的聚焦性影响较小, 但影响速度归集精度, 估计 v_{py} 后才能估计 v_{px} 。图 14 的结果表明, 如果 v_{px} 估计精度不够会使回波中存在残余的二次相位误差, 造成图像发生一定的散焦, 可以通过重新选取数据进行估计来提高估计精度, 也可以采用相位梯度自聚焦算法 (PGA) 来实现精聚焦。

3 结束语

本文针对中轨 SAR 体制下海上运动舰船目标的成像问题, 根据中轨 SAR 的轨道模型, 建立了适合描述舰船运动的几何模型, 分析了 C 波段情况下不同阶数斜距模型的适用性。计算出了在常规的速度范围内, 舰船二维运动引起的中轨 SAR 回波各次相位误差。给出了利用卫星运动参数和多普勒参数估计相结合的舰船二维速度估计方法, 进而提出了一种基于二维速度修正斜距系数的中轨 SAR 舰船目标成像的方法。仿真实验结果表明, 在估计数据段选取合理的情况下, 本文方法估计出的速度误差小于 0.1 m/s, 经过斜距系数修正成像后的舰船目标聚焦效果明显, 能够满足高分辨成像的要求, 验证了本文算法的有效性。此外, 在本文研究中没有考虑长合成孔径时间内舰船目标的加速度以及三维转动的影响, 这需要后续深入研究。

参考文献

- [1] TOMIYASU K. Tutorial review of synthetic aperture radar (SAR) with applications to imaging the ocean surface[J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(5): 563–583.
- [2] CHEN C W, MOUSSESIAN A. MEO SAR system concepts and technologies for earth remote sensing[C]// Space 2004 Conference and Exhibit, September 28-30, 2004, San Diego, California. <https://doi.org/10.2514/6.2004-5904>.
- [3] MATAR J, KRIEGER G. Potentials and limitations of MEO SAR[C]// Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 2016.
- [4] 胡滨. 地球同步轨道单基 SAR 系统成像关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [5] HU B, JIANG Y C, ZHANG Y, et al. Analysis for integration time and resolution in geosynchronous SAR[C]// 2016 IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, 2016.
- [6] HU C, LONG T, LIU Z, et al. An Improved frequency domain focusing method in geosynchronous SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5514–5528.
- [7] 王卓群. 地球同步轨道合成孔径雷达单基/双基成像算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] ZHANG Y, LU Y C, ZHANG H J, et al. A modified CSA for missile-borne SAR with curved trajectory[C]// 2020 IEEE Radar Conference, Florence, Italy, 2020.
- [9] 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.

[作者简介]

赵彬 1971 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理。

廖婉伶 1998 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达成像算法研究。

朱鑫 1995 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达成像算法研究。

黄祖镇 1989 年生, 博士, 主要研究方向为星载 SAR/InSAR/GMTI 总体技术研究、SAR 卫星信息处理。

张云 1975 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像处理、杂波抑制、运动目标检测与识别和遥感图像的智能处理技术。

(本文编辑: 傅杰)