



基于线性正则变换的复杂运动目标的 3-D InISAR 成像

辛红彩¹, 李炳照^{2,3*}

1. 北京电子科技学院密码科学与技术系, 北京 100070

2. 北京理工大学数学与统计学院, 北京 100081

3. 北京理工大学复杂信息数学表征分析与应用北京市重点实验室, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: li_bingzhao@bit.edu.cn

收稿日期: 2022-08-28; 修回日期: 2022-11-23; 接受日期: 2023-01-06; 网络出版日期: 2023-10-16

国家自然科学基金 (批准号: 62171041) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 328202201) 资助项目

摘要 二维的逆合成孔径雷达 (two-dimensional inverse synthetic aperture radar, 2-D ISAR) 成像是目标三维 (three-dimensional, 3-D) 几何结构在成像平面的投影, 逐渐难以满足现代工程中目标识别与分类的需求, 特别是复杂运动目标. 近年来, 干涉 ISAR (interferometric ISAR, InISAR) 成像技术能够高分辨地重构 3-D 目标的几何结构而颇受关注. 本文提出一种基于线性正则变换 (linear canonical transform, LCT) 的复杂运动目标的 3-D InISAR 成像算法. 首先, 结合目标复杂运动分析, 给出了目标所产生的原始回波信号. 经过运动补偿和图像对准后, 将方位向回波建模为线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号. 其次, 根据 LFM 信号的时频特性, 本文提出了基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法. 该算法不仅能够获取聚焦的多通道 2-D ISAR 图像, 而且很好地保留了相位信息. 最后, 利用干涉技术, 提出了新的 3-D InISAR 成像算法, 实现了目标的高分辨 3-D 几何结构重建. 此外, 文中讨论并分析了所提算法的时频聚集性、计算量和基线长度影响. 不同的仿真实验和结果证明了所提算法的优越性能.

关键词 复杂运动目标, InISAR, 线性正则变换, 成像算法, 三维坐标重构

1 引言

近几十年来, 高分辨逆合成孔径雷达 (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 在军事和民用领域发挥了十分重要的作用, 特别是在目标检测、识别和分类方面^[1~4]. 二维 (two-dimension, 2-D) ISAR 图像的高分辨率是由发射信号的大带宽和雷达与目标之间明显的相对运动决定的^[5]. 实际上, 2-D ISAR

引用格式: 辛红彩, 李炳照. 基于线性正则变换的复杂运动目标的 3-D InISAR 成像. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 1994–2015, doi: 10.1360/SSI-2022-0344
Xin H C, Li B Z. 3-D InISAR imaging for targets with complex motion based on linear canonical transform (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 1994–2015, doi: 10.1360/SSI-2022-0344

成像结果是三维 (three-dimension, 3-D) 目标空间向 2-D 成像平面的投影, 这难以获得目标的高度信息及其他形状特征. 另外, 非合作目标的成像平面依赖于目标有效旋转运动, 而此运动在成像时间内是变化的, 即非合作目标的成像平面是不可预测的, 尤其是复杂运动目标^[6~8]. 这必然会带来一些问题: 不同目标在某个成像平面上会得到相同的图像或者相同的目标在不同时刻又可以得到不同的图像. 因此, 尽管一些 2-D ISAR 成像算法可以获得两个维度的高分辨率图像, 但仍会对重要军事与民用场景中的目标识别与分类带来不可避免的困难.

为了弥补上述不足, 很多致力于 ISAR 成像领域的学者们研究了不少成像算法来重建目标的 3-D 几何结构^[8~17]. 这些算法大致可以分为两类: 第 1 类算法无需干涉技术就可实现目标的 3-D 几何结构重建^[7, 10~13]. 这类算法主要通过两种方式得到目标散射点的 3-D 坐标: (1) 单个天线利用目标运动得到多个不同视角下的 ISAR 图像序列, 跟踪定位散射点位置来实现 3-D 目标重构; (2) MIMO 阵列中结合 ISAR 成像技术, 利用时间采样代替空间采样密度来得到目标的 3-D 成像. 尽管这两种方式无需干涉技术, 但它们需要已知目标的运动规律和较长的观测时间或在 MIMO 装置中容易受数据填充效果不佳而影响 3-D 重建效果.

另一类 3-D ISAR 成像算法就是干涉 ISAR (interferometric ISAR, InISAR). 该类算法通常是在双正交基线下的 3 个雷达天线获得 3 个高分辨的 2-D ISAR 图像, 然后基于 2-D 图像的相位信息和干涉技术来得到目标的 3-D 几何结构重建. 在 3-D InISAR 成像中, 散射点沿基线方向的高度重构依赖于干涉相位差的信息. 由于相位差对比波长更小的路程都是敏感的, 因此这种干涉类算法确定的高度坐标信息是非常精确的. 但同时这类成像算法要求不模糊的干涉相位信息, 所以在重构过程中不仅需要高分辨的 2-D ISAR 图像, 而且在回波信号处理过程中不能破坏其相位信息. 对于复杂运动目标来讲, 其多普勒 (Doppler) 信号在观测时间内是时变的, 一般经过初步处理后, 将其建模为多项式相位信号, 比如线性调频 (linear frequency modulated, LFM) 信号^[14~16, 18]. 传统的基于傅里叶变换 (Fourier transform, FT) RD 成像技术得到散焦的 ISAR 图像, 已无法进行后续散射点提取与目标重构. 为此很多基于时频分布的高分辨 2-D ISAR 成像算法被提出^[14~16, 18, 19]. 考虑到 InISAR 成像系统对 2-D ISAR 图像高质量和相位信息的要求, 现有很多算法或分辨率受限或破坏了信号的相位信息而不再适用于 InISAR 成像领域. 文献 [15] 提出利用二阶局部多项式 FT 估计整体旋转向量, 从而完成 3-D InISAR 成像. 但在参数估计中, 并没有给出调频率的匹配范围. 文献 [16, 18] 提出采用分数阶傅里叶变换 (fractional Fourier transform, FRFT) 得到了较好的 2-D 图像并保存其相位信息, 实现了目标的 3-D 坐标重构, 但是文献 [16] 没有考虑初始旋转角度而产生的坐标错位. 文献 [18] 在非正交双基线下提出了利用 FRFT 处理 LFM 信号模型的 3-D InISAR 成像算法并得到了目标的 3-D 坐标重构. 但是, 正如在文献 [20] 中指出的, 直接影响 FRFT 性能的是 $\cot \alpha$ 而不是 FRFT 的旋转角度 α , 并且文献 [20] 也验证了非均匀的 α 对信号表征和参数估计具有更好的性能. 因此, 继续探索新的高精度的 3-D 重构算法仍然十分迫切, 这对军事或民用目标的识别与分类具有重要意义.

线性正则变换 (linear canonical transform, LCT) 是一种包含了 FT 和 FRFT 的多参数线性积分变换, 由于其多参数的灵活性, 增加了信号的观测角度和可视空间, 因此基于 LCT 的信号处理理论与方法已被广泛地应用于滤波设计、雷达系统与信号分析、时频分析、相位恢复等信号处理领域^[21~23]. 本文针对复杂运动目标, 提出一种基于 LCT 的新型 3-D InISAR 成像算法. 首先, 在 L-型阵列天线装置下, 分析了目标的径向运动和 3-D 旋转运动对回波信号的影响, 并得到了不同的雷达天线的原始回波信号模型. 其次, 图像对准作为 InISAR 成像的重要处理过程, 本文在距离向上采用一种联合运动补偿方法实现运动补偿和距离对齐^[24], 在方位向上利用经典的旋转运动参数估计方法实现方位对准, 从而完成图像对准^[25, 26]. 根据非合作目标的机动性, 3 个雷达天线的方位向回波信号建模为 LFM 信

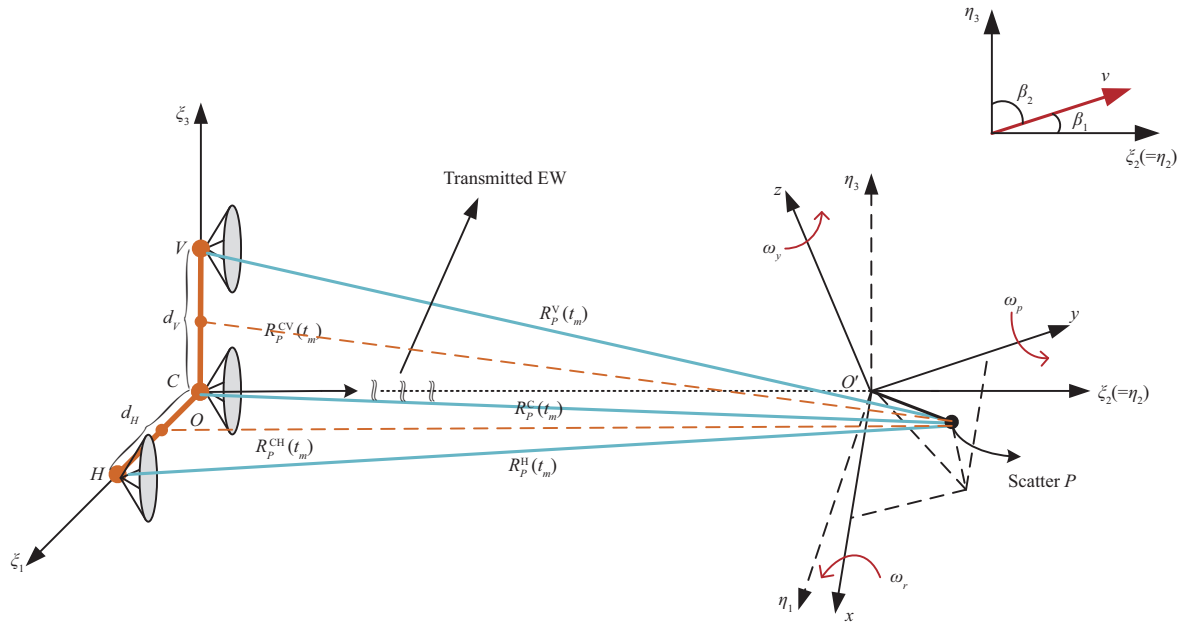


图 1 (网络版彩图) InISAR 几何系统模型
 Figure 1 (Color online) InISAR geometric system model

号. 考虑到 LCT 对 LFM 信号高分辨时频表征与处理的优势, 本文提出基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法并得到了聚焦的多通道 2-D ISAR 图像, 同时所提算法能够完好保存图像的相位信息. 最后, 结合所提 2-D ISAR 成像算法和干涉技术, 进一步提出了基于 LCT 的 3-D InISAR 成像算法来实现目标 3-D 坐标重构. 此外, 本文还对所提算法的时频分辨率、计算量、基线影响、不同的仿真实验结果进行了详细的分析与讨论, 从而说明了所提算法良好的重构性能.

本文的结构安排如下: 第 2 节介绍了 InISAR 成像几何结构和信号模型. 第 3 节在完成图像对准后, 主要提出了基于 LCT 的多通道 2-D ISAR 成像算法, 包括算法时频聚集性和计算量的讨论. 此算法能够保存相位信息, 所以第 4 节结合了干涉技术, 提出了基于 LCT 的 3-D InISAR 成像算法, 同时利用仿真实验验证了所提算法重构效果. 最后第 5 节总结了本文的主要内容和创新之处.

2 信号模型

2.1 InISAR 几何模型

图 1 是一个 InISAR 成像几何系统, 该系统包含了 3 个坐标系. 第 1 个是具有 L-型的 3 个雷达组成的 $T_\xi: O - \xi_1\xi_2\xi_3$, 其中天线 C 与原点 O 重合, 坐标轴的方向分别由垂直基线方向, 雷达视线方向和水平基线方向决定, 基线长度用 d_V 和 d_H 表示. 在该成像系统中, 天线 C 既是发射端也是接收端, 其余两个雷达天线只是接收端, 因此整体可看作是“一发三收”装置. 第 2 个是 $T_\eta: O' - \eta_1\eta_2\eta_3$, 与 T_ξ 方向相同但原点位于目标几何中心, 其可看作是目标与雷达之间的参考系统. 第 3 个坐标系 $T_{xyz}: O' - xyz$ 与前两个标系方向不同, 是目标本身所在的坐标系, 目标上任意散射点 P 在 T_{xyz} 中的坐标为 $[x_p, y_p, z_p]$. 假设 T_{xyz} 与 T_η 的对应坐标轴之间的初始角度为 $\theta_{r0}, \theta_{p0}, \theta_{y0}$.

对于复杂运动目标, 其具有 3-D 旋转运动即横摇 (roll)、纵摆 (pitch) 与偏航 (yaw), 对应的旋转角

速度是 ω_r, ω_p 和 ω_y . 若目标的径向速度是 v , 且行驶方向与 T_η 的坐标轴 $O'\eta_2, O'\eta_3$ 之间的角度为 β_1 和 β_2 , 那么在整个成像时间 T_a 内, $R_p^i(t_m)$ 是散射点 P 到雷达 i 的距离, $i \in \{C, H, V\}$, 近似地记为

$$\mathbf{R}_p^i(t_m) = \mathbf{R}_{O'}^i(t_m) + \mathbf{R}_{pO'}^i(t_m), \quad (1)$$

其中第 1 项 $\mathbf{R}_{O'}^i(t_m)$ 由初始距离 $\mathbf{R}_p^i(t_0)$ 和径向运动 $\mathbf{R}_{\text{tran}}^i = \int_{T_a} \mathbf{v} dt_m$ 决定, 第 2 项 $\mathbf{R}_{pO'}^i(t_m)$ 由目标相对各雷达天线的旋转运动决定.

(1) 径向运动. 速度对所有散射点的影响都是相同的, 沿着 T_η 中不同坐标轴方向, \mathbf{v} 可以分解为

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\eta_1} + \mathbf{v}_{\eta_2} + \mathbf{v}_{\eta_3}, \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\eta_1} &= v \cdot \cos \beta_2 \sin \beta_1 \cdot \mathbf{i}_{\eta_1}, \\ \mathbf{v}_{\eta_2} &= v \cdot \cos \beta_2 \cos \beta_1 \cdot \mathbf{j}_{\eta_2}, \\ \mathbf{v}_{\eta_3} &= v \cdot \sin \beta_2 \cdot \mathbf{k}_{\eta_3}, \end{aligned}$$

这里 v 是向量 \mathbf{v} 的模, 且 $\mathbf{i}_{\eta_1}, \mathbf{j}_{\eta_2}, \mathbf{k}_{\eta_3}$ 分别表示坐标系 T_η 中坐标轴的单位方向向量.

(2) 旋转运动. 复杂运动目标必然伴随着旋转运动, 关于横摇、纵摆、偏航的 3-D 旋转矩阵如下:

$$\Omega_{\text{roll}}(t_m) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ 0 & \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\Omega_{\text{pitch}}(t_m) = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & 0 & -\sin \theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_p & 0 & \cos \theta_p \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\Omega_{\text{yaw}}(t_m) = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & -\sin \theta_y & 0 \\ \sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中在成像时间内, 3 个方向的旋转运动转过的角度为

$$\theta_\chi(t_m) = A_\chi \cos(\omega_\chi t_m + \phi_{0\chi}), \quad \chi = r, p, y, \quad (6)$$

且 A_χ, ω_χ 分别是最大角幅度和旋转角速度, $\phi_{0\chi}$ 是初始相位信息. 因此整体的旋转矩阵为

$$\Omega(t_m) = \Omega_{\text{roll}}(t_m)\Omega_{\text{pitch}}(t_m)\Omega_{\text{yaw}}(t_m). \quad (7)$$

坐标系 T_{xyz} 与 T_η 之间的初始角度 $\theta_{r0}, \theta_{p0}, \theta_{y0}$ 可构成初始旋转矩阵 Ω_0 , 可看作目标在初始时刻的旋转状态. 若暂不考虑径向运动, 在成像时间内散射点 P 在参考系统 T_η 的坐标为

$$[\eta_{1p}(t_m), \eta_{2p}(t_m), \eta_{3p}(t_m)]^T = \Omega(t_m)\Omega_0 \cdot [x_p, y_p, z_p]^T. \quad (8)$$

根据以上分析和远场假设, 式 (1) 可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_p^i(t_m) &= \mathbf{R}_{O'}^i(t_0) + \mathbf{R}_{\text{tran}}^i(t_m) + \mathbf{R}_{\text{rot}_p}^i(t_m) \\ &= \mathbf{R}_0^i + \int_{T_a} \mathbf{v} dt_m + \int_{T_a} \Omega(t_m) \Omega_0 \cdot [x_p, y_p, z_p]^T dt_m, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 \mathbf{R}_0^i 表示雷达与目标之间的初始距离向量, $i \in \{C, H, V\}$.

2.2 回波信号模型

假设雷达 C 发射带宽为 B 的 LFM 脉冲信号, 则在各个接收端 i 的回波信号为

$$s_r^i(t, t_m) = \sum_{l=1}^L A_l^i w(t - \tau_l^i, t_m) \cdot \exp \{j2\pi f_0(t - \tau_l^i)\} \exp \{j\pi\gamma(t - \tau_l^i)^2\}, \quad i \in \{C, H, V\}, \quad (10)$$

其中 $w(t - \tau_l^i, t_m) = w_r(t - \tau_l^i)w_a(t_m)$ 是关于 t 和 t_m 二维窗函数, 且

$$w_r(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T_p/2, \\ 0, & \text{others,} \end{cases} \quad w_a(t_m) = \begin{cases} 1, & |t_m| \leq T_a/2, \\ 0, & \text{others,} \end{cases}$$

其中 t 和 t_m 分别是快时间和慢时间, T_p 和 T_a 分别表示脉冲宽度和成像时间. 发射 N_a 个 LFM 脉冲信号, 脉冲重复间隔为 T , 则 $t_m = mT$ ($m = 1, 2, \dots, N_a$), 成像时间为 $T_a = N_a \cdot T$. $f_0, \gamma = B/T_p$ 是发射信号的载频和调频率. L 是一个距离单元内散射点个数. 对于不同的雷达和散射点, 时延 $\tau_l^i = [R_l^C(t_m) + R_l^i(t_m)]/c$, c 是光速. 考虑到雷达通常为远场目标, 故各个散射点的后向反射系数对不同的接收雷达可看作是相同的, 即 $A_l^i = A_l, i \in \{C, H, V\}$.

为了得到高分辨的距离像, 采用 Dechirp 技术进行距离压缩. 不妨设参考信号为

$$s_{\text{ref}} = w_r(t - \tau_{\text{ref}}) \exp \left\{ j2\pi \left\{ f_0(t - \tau_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}\gamma(t - \tau_{\text{ref}})^2 \right\} \right\}, \quad (11)$$

其中 $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/c$ 是由参考距离 R_{ref} 得到的参考时延. 对混频后的信号经过残余视频相位补偿和 FFT, 得到高分辨的距离像

$$S_1^i(f_r, t_m) = \sum_{l=1}^L A_l T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} \Delta R_l^i(t_m) \right] \right\} \cdot w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} \Delta R_l^i(t_m) \right\}, \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta R_l^i(t_m) &= [R_l^C(t_m) + R_l^i(t_m)]/2 - R_{\text{ref}} \\ &= \widetilde{\Delta R}_0^i + \widetilde{R}_{\text{tran}}^i(t_m) + \widetilde{R}_{\text{rot}_l}^i(t_m) \\ &= \left[\frac{R_0^C + R_0^i}{2} - R_{\text{ref}} \right] + \frac{R_{\text{tran}}^C(t_m) + R_{\text{tran}}^i(t_m)}{2} + \frac{R_{\text{rot}_l}^C(t_m) + R_{\text{rot}_l}^i(t_m)}{2}, \end{aligned} \quad (13)$$

这里 $R_0^i, R_l^C(t_m), R_l^i(t_m)$ 是 $\mathbf{R}_0^i, \mathbf{R}_l^C(t_m)$ 和 $\mathbf{R}_l^i(t_m)$ 的模, 其中 R_0^i 表示初始时刻各雷达到目标中心的距离, $R_l^C(t_m), R_l^i(t_m)$ 表示第 l 个散射点在不同观测时刻到各雷达的距离, $i \in \{C, H, V\}$. $\widetilde{\Delta R}_0^i = [\frac{R_0^C + R_0^i}{2} - R_{\text{ref}}]$ 是 Dechirp 处理后的相对初始距离, $\widetilde{R}_{\text{tran}}^i(t_m) = \frac{R_{\text{tran}}^C(t_m) + R_{\text{tran}}^i(t_m)}{2}$ 和 $\widetilde{R}_{\text{rot}_l}^i(t_m) = \frac{R_{\text{rot}_l}^C(t_m) + R_{\text{rot}_l}^i(t_m)}{2}$ 则是由径向运动和旋转运动产生的相对运动距离.

把式 (13) 带入式 (12),

$$S_2^i(f_r, t_m) = \sum_{l=1}^L A_l T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} \left(\widetilde{\Delta R}_0^i + \widetilde{R}_{\text{tran}}^i(t_m) + \widetilde{R}_{\text{rot}_l}^i(t_m) \right) \right] \right\} \cdot w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[\widetilde{\Delta R}_0^i + \widetilde{R}_{\text{tran}}^i(t_m) + \widetilde{R}_{\text{rot}_l}^i(t_m) \right] \right\}, \quad (14)$$

其中 $\lambda = c/f_0$. 根据式 (14), 可以发现距离像是时变的. 要得到聚焦的 ISAR 图像, 需要补偿由 $\widetilde{R}_{\text{tran}}^i(t_m)$ 导致的整体距离像偏移和 $\widetilde{R}_{\text{rot}_l}^i(t_m)$ 产生的距离徙动, 同时也要解决由固定的距离差和电磁波路程差导致的不同雷达天线间图像不匹配问题.

3 基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法

3.1 图像对准

假设距离徙动已被校正, 下面进行图像对准: 距离向对齐和方位向对准. 在距离向采用联合的径向运动补偿方法, 即由积累交叉相关方法 (accumulated cross correlation method, ACCM) 完成距离对齐^[24]. 该方法以中心天线 C 为标准, 通过积累多个距离单元的距离像与原始距离像进行相关处理, 然后搜索相关结果的最大值找到合适的积累距离单元数目, 最后实施对各个天线回波数据联合包络对齐. 该方法采用多个距离单元的距离像的积累相关, 可有效降低距离对齐的误差. 另一方面, 为进一步提高对齐精度, 需要对距离像频谱进行内插处理. 此外, 相位矫正则采用经典的多普勒中心追踪 (Doppler centroid-tracking, DCT) 的方法完成. 经过上述处理后, 不同天线产生的 1-D 距离像为

$$S_3^C(f_r, t_m) = \sum_{l=1}^L A_l T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} \widetilde{\Delta R}_{l0}^C \right] \right\} \cdot w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[\widetilde{\Delta R}_0^C + \widetilde{R}_{\text{rot}_l}^C(t_m) \right] \right\}, \quad (15)$$

$$S_3^H(f_r, t_m) \approx \sum_{l=1}^L A_l T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} \widetilde{\Delta R}_{l0}^C \right] \right\} \cdot w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[\widetilde{\Delta R}_0^C + \widetilde{R}_{\text{rot}_l}^C(t_m) \right] \right\} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \left[R_l^C(t_m) - R_l^H(t_m) \right] \right\}, \quad (16)$$

$$S_3^V(f_r, t_m) \approx \sum_{l=1}^L A_l T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} \widetilde{\Delta R}_{l0}^C \right] \right\} \cdot w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[\widetilde{\Delta R}_0^C + \widetilde{R}_{\text{rot}_l}^C(t_m) \right] \right\} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \left[R_l^C(t_m) - R_l^V(t_m) \right] \right\}, \quad (17)$$

其中 $\widetilde{\Delta R}_{l0}^C = \widetilde{\Delta R}_0^C + \widetilde{R}_{\text{rot}_l}^C(t_0)$.

在方位向的图像对准中, 不匹配问题主要是由于电磁波路程差导致的, 即式 (16) 和 (17) 中的第 2 个指数项中的 $R_l^C(t_m) - R_l^H(t_m)$ 和 $R_l^C(t_m) - R_l^V(t_m)$. 因此在图像对准中需要通过补偿路径差来消除图像方位向的不匹配. 不妨以某个散射点的运动情况为例, 图 2 展示了具体的角度变化. 下面将详细分析其对图像匹配影响. 根据式 (16) 中所包含的路径差, 有

$$R_l^C(t_m) - R_l^H(t_m) \approx d_H \sin \theta_H(t_m) \approx d_H \theta_H(t_m), \quad (18)$$

其中 $\theta_H(t_m)$ 是 $M_H P'$ 与 $M_H P$ 之间的瞬时角度, 特别地, $\theta_H(t_0)$ 表示 $M_H P'$ 与 $M_H P$ 之前的初始角度.

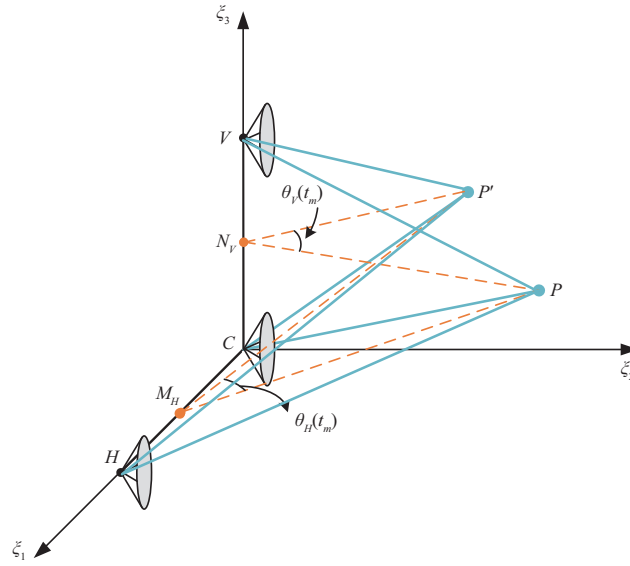


图 2 (网络版彩图) 目标运动细节分析

Figure 2 (Color online) The detail analysis of target motion

根据上式, 补偿波程差的问题可转化为角运动参数估计的问题. 本小节采样一维距离像角运动参数估计的方法^[25], 利用多项式拟合得到 $\hat{\theta}_H(t_m)$, 然后用 $\exp\{-j\frac{2\pi d_H}{\lambda}\hat{\theta}_H(t_m)\}$ 补偿由波程差造成的图像不匹配现象. 此外, 由于波程差总是大于或远大于信号的波长, 则往往有 $\theta_H(t_m) > 2\pi$ 出现相位缠绕问题. 考虑到 InISAR 的目标重建中相位信息的重要性, 因此很多解缠绕的算法被提出. 在此, 本文采用一维路径积分的方法完成相位解缠绕, 恢复相位至主值区间范围^[27]. 天线 H 和 V 得到图像对准的结果如下:

$$\begin{aligned}
 S_{3c}^H(f_r, t_m) &= S_3^H(f_r, t_m) \exp\left\{-j\frac{2\pi d_H}{\lambda}\hat{\theta}_H(t_m)\right\} \\
 &= \sum_{l=1}^L A_l T_p \text{sinc}\left\{T_p\left[fr + \frac{2\gamma}{c}\widetilde{\Delta R_{l0}^C}\right]\right\} \\
 &\quad \cdot w_a(t_m) \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}\left[\widetilde{\Delta R_0^C} + \widetilde{R_{rot_l}^C}(t_m)\right]\right\} \exp\left\{j\frac{2\pi d_H}{\lambda}\hat{\theta}_H(t_0)\right\}, \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{3c}^V(f_r, t_m) &= S_3^V(f_r, t_m) \exp\left\{-j\frac{2\pi d_V}{\lambda}\hat{\theta}_V(t_m)\right\} \\
 &= \sum_{l=1}^L A_l T_p \text{sinc}\left\{T_p\left[fr + \frac{2\gamma}{c}\widetilde{\Delta R_{l0}^C}\right]\right\} \\
 &\quad \cdot w_a(t_m) \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}\left[\widetilde{\Delta R_0^C} + \widetilde{R_{rot_l}^C}(t_m)\right]\right\} \exp\left\{j\frac{2\pi d_V}{\lambda}\hat{\theta}_V(t_0)\right\}. \quad (20)
 \end{aligned}$$

3.2 基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法

在完成图像对准后, 对于复杂运动目标, 其多普勒表现往往是时变的, 这导致传统的 RD 成像技术得到的 ISAR 图像并不理想. 一般地, 将方位向回波信号建模为高阶多项式相位信号的形式, 经过处理后能够得到聚焦的 ISAR 图像, 这一事实已经被很多文献证实^[18, 19, 28]. 以中心天线 C 为例, 方位向

回波信号 (15) 可建模为 LFM 信号

$$S_4^C(f_r, t_m) = \sum_{l=1}^L \sigma_l w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \widetilde{\Delta R_0^C} \right\} \exp \left\{ -j2\pi(a_{1l}t_m + a_{2l}t_m^2) \right\}, \quad (21)$$

其中 $\sigma_l = A_l T_p \cdot \text{sinc} \left\{ T_p \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} \widetilde{\Delta R_{l0}^C} \right] \right\}$, a_{1l} 和 a_{2l} 是第 l 个散射点多普勒回波的相位系数. 类似地, 在式 (19) 和 (20) 中的方位向信号也具有如下形式:

$$S_4^H(f_r, t_m) = \sum_{l=1}^L \sigma_l w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[\widetilde{\Delta R_0^C} - \frac{1}{2} d_H \hat{\theta}_H(t_0) \right] \right\} \exp \left\{ -j2\pi(a_{1l}t_m + a_{2l}t_m^2) \right\}, \quad (22)$$

$$S_4^V(f_r, t_m) = \sum_{l=1}^L \sigma_l w_a(t_m) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[\widetilde{\Delta R_0^C} - \frac{1}{2} d_V \hat{\theta}_V(t_0) \right] \right\} \exp \left\{ -j2\pi(a_{1l}t_m + a_{2l}t_m^2) \right\}. \quad (23)$$

对于 LFM 信号或更高阶相位的信号模型, 已经有很多基于 RID 技术的 ISAR 成像算法, 但大部分算法都破坏了图像的相位信息, 难以实现的 3-D 坐标重构^[3, 4, 20, 29]. 考虑到 InISAR 成像中相位信息的重要性, 因此能够保存目标相位信息的新型高分辨 2-D ISAR 成像算法对 3-D 目标重构十分重要. 而 LCT 是一种包含了 FT 和 FRFT 的多参数线性积分变换, 在信号处理过程中具有比 FT 和 FRFT 更丰富的灵活性和更多的时频表征平面, 并且不会破坏信号的相位信息^[21], 其定义形式如下:

$$X_A(u) = \int_{\mathbb{R}} x(t) K_A(t, u) dt, \quad (24)$$

其中变换核函数

$$K_A(t, u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{j}b} \exp \left\{ j2\pi \left\{ \frac{at^2 + du^2}{2b} - j \frac{tu}{b} \right\} \right\}, & b \neq 0, \\ \sqrt{d} \exp \{ j\pi c d u^2 \} \delta(t - du), & b = 0. \end{cases} \quad (25)$$

这里 LCT 的参数矩阵 $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$, 且 $a, b, c, d \in \mathbb{R}$, $|A| = 1$, 即 LCT 具有 3 个自由参数, 可实现时频平面的旋转与伸缩, 具有丰富的信号表征与处理维度, 能够更好地处理调频类信号. 特别地, (1) 当 $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, LCT 退化为 FT, FT 无自由参数, 只能从时域变换到固定频域表征、处理信号. (2) 当 $A = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$, LCT 退化为角度为 α 的 FRFT. FRFT 具有 1 个自由参数, 仅能实现时频平面的旋转变换. (3) 当 A 取其他矩阵时, LCT 也可退化为其他仿射变换.

因此, 采用 LCT 对中心天线 C 回波信号 (21) 进行表征与处理, 当 $a_{2l} = \frac{a}{2b}$ 时, 就得到在最优 LCT 域的 2-D ISAR 图像 I^C

$$\begin{aligned} I^C(f_r, u) &= \int_{\mathbb{R}} S_4^C(f_r, t_m) K_A(t_m, u) dt_m \\ &= \sum_{l=1}^L \frac{\sigma_l}{\sqrt{j}b} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \widetilde{\Delta R_0^C} \right\} \int_{T_a} \exp \left\{ -j2\pi(a_{1l}t_m + a_{2l}t_m^2) \right\} K_A(t_m, u) dt_m \\ &= \sum_{l=1}^L \frac{A_l T_p T_a}{\sqrt{j}b} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \widetilde{\Delta R_0^C} + j\pi \frac{du^2}{b} \right\} \cdot \text{sinc} \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c} \widetilde{\Delta R_{l0}^C} \right) \right] \text{sinc} \left[T_a \left(\frac{u}{b} + a_{1l} \right) \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

类似地, 天线 H 和 V 的方位向回波信号也已被建模为 LFM 信号, 因此利用 LCT 同样可得到高

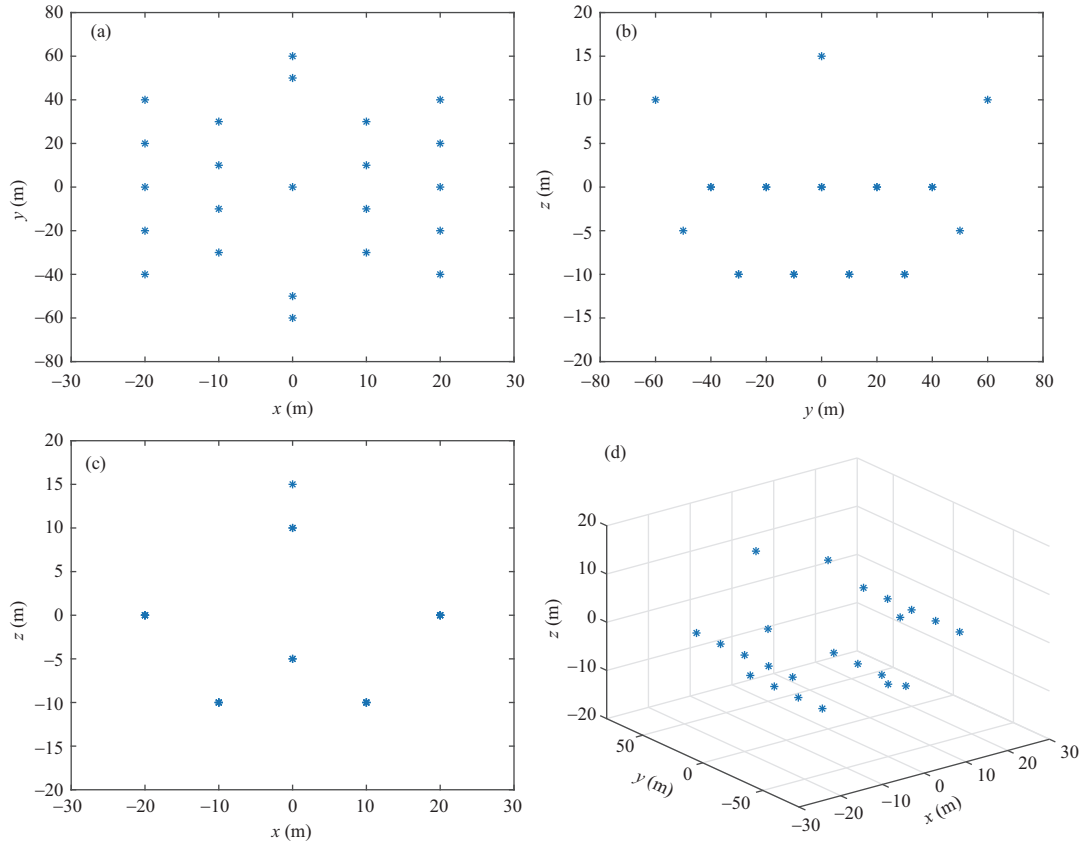


图 3 (网络版彩图) 舰船目标仿真模型

Figure 3 (Color online) The simulated model of the ship target. (a) x - y plane; (b) y - z plane; (c) x - z plane; (d) 3-D model

分辨的 2-D 图像 I^H 和 I^V

$$\begin{aligned}
 I^H(f_r, u) &= \int_{T_a} S_4^H(f_r, t_m) K_A(t_m, u) dt_m \\
 &= \sum_{l=1}^L \frac{A_l T_p T_a}{\sqrt{j^b}} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \widetilde{\Delta R}_0^C + j\pi \frac{du^2}{b} \right\} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} d_H \hat{\theta}_H(t_0) \right\} \\
 &\quad \cdot \text{sinc} \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c} \widetilde{\Delta R}_{l0}^C \right) \right] \text{sinc} \left[T_a \left(\frac{u}{b} + a_{1l} \right) \right], \tag{27}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I^V(f_r, u) &= \int_{T_a} S_4^V(f_r, t_m) K_A(t_m, u) dt_m \\
 &= \sum_{l=1}^L \frac{A_l T_p T_a}{\sqrt{j^b}} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \widetilde{\Delta R}_0^C + j\pi \frac{du^2}{b} \right\} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} d_V \hat{\theta}_V(t_0) \right\} \\
 &\quad \cdot \text{sinc} \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c} \widetilde{\Delta R}_{l0}^C \right) \right] \text{sinc} \left[T_a \left(\frac{u}{b} + a_{1l} \right) \right]. \tag{28}
 \end{aligned}$$

为了验证提出的 LCT 域 2-D ISAR 成像算法的有效性, 利用不同复杂运动状态下目标的回波数据进行验证. 图 3 是舰船目标模型及其俯视图、正视图和侧视图. 在 L -型的天线阵列下, 其径向运动速度为 20 m/s, 航行方向为 $\beta_1 = -15^\circ$, $\beta_2 = 0^\circ$. 图 4 是 1-D 旋转 (只有偏航) 下由经典 RD 成像技术

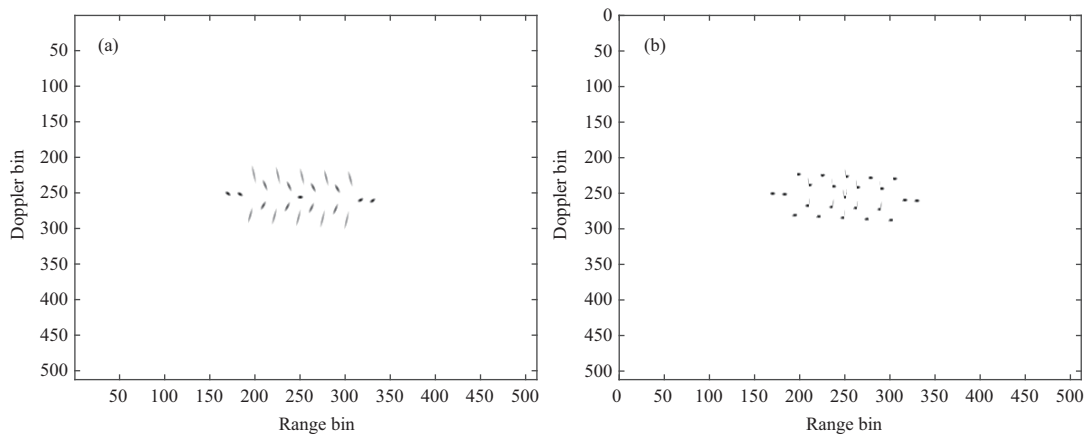


图 4 1-D 旋转运动的 ISAR 成像

Figure 4 The ISAR images of the ship target with 1-D rotation. (a) By RD technique; (b) by proposed method

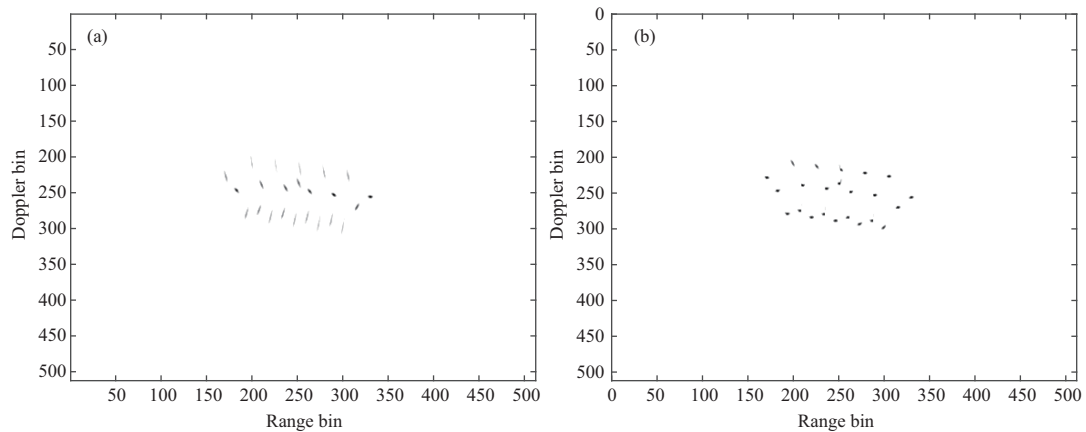


图 5 3-D 旋转运动的 ISAR 成像

Figure 5 The ISAR images of the ship target with 3-D rotation. (a) By RD technique; (b) by proposed method

和所提算法得到. 从图 4(a) 中看出, RD 图像具有明显的散焦, 这是由于 RD 成像技术是基于 FT 变换得到的, 对处理非平稳信号已不再适用. 图 4(b) 则是由基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法得到的. 相比图 4(a), 所提算法能够得到更聚焦的目标图像. 这是由于 LCT 是处理非平稳 LFM 信号的有力工具, 具有更好的能量聚集性, 可以刻画信号的精细化时频特征, 因此所提算法能够得到高质量的 ISAR 图像. 对于更复杂的 3-D 旋转运动状态下的舰船目标, 其 2-D ISAR 成像结果如图 5. 对比图 5(a) 和 (b), 所提算法仍然能够得到高分辨的 ISAR 图像, 再次验证了提出算法的优越性. 此外, 考虑到噪声对 ISAR 成像的影响, 在原始回波数据中加入高斯 (Gauss) 白噪声且信噪比为 5 dB. 图 6 是噪声下的成像结果, 所提算法仍然能够得到聚焦的 ISAR 图像, 这为进一步利用 2-D ISAR 图像进行目标识别与分类提供了新的工具与算法.

3.3 算法分析

(1) 回波信号的时频聚集性. 对于复杂运动目标, 回波信号的多普勒表现出时变特性. 本小节通过对中心天线回波的时频表征来说明回波信号的时变特性, 并进一步解释所提算法能够得到聚焦 ISAR

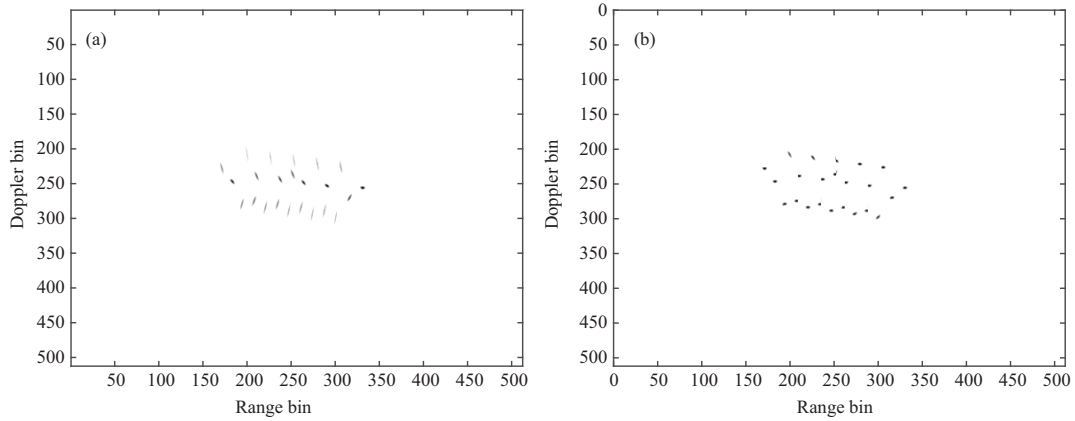


图 6 噪声下 3-D 旋转运动的 ISAR 成像

Figure 6 The ISAR images of the ship target with 3-D rotation with white Gaussian noise. (a) By RD technique; (b) by proposed method

图像的原因. 针对 3-D 旋转下的复杂运动目标, 图 7~9 分别是第 192, 228, 256 个距离单元的回波数据, 采用光滑的伪 Wigner-Ville 分布 (smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD) [30], FT, LCT 对回波信号进行表征. 图 7(a)~9(a) 是基于 SPWVD 的时频分布, 斜直线表明了频率随时间线性变化关系, 即线性调频性质. 这说明了所建立的 LFM 信号模型的合理性, 其可以很好地反映目标运动规律. 图 7(b)~9(b) 是基于 FT 得到的回波信号频域特征, 相比于在 LCT 域得到的图 7(c)~9(c), 后者具有更好的时频聚集性, 这表明 LCT 在处理 LFM 信号时具有更好的能量聚集性和分辨能力, 同时也解释了基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法能够得到比 RD 算法更聚焦的目标 ISAR 图像的原因. 结合 LCT 的线性性质, 为进一步研究 3-D InSAR 成像算法和目标 3-D 结构重建奠定了重要的理论基础.

(2) 计算复杂度. 基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法的计算量主要包括: (1) 脉冲压缩: $3N(M\log_2 M + M^2)$; (2) 图像对准中的距离向的联合 ACCM, DCT, 方位向相位解缠绕和角运动参数估计与拟合: $3M(4N + N\log_2 N) + MN^2$; (3) 成像中 LCT 的实施: $3QNM\log_2 M$. 因此整个过程的计算复杂度为 $O(MN\log_2(MN)) + O(QMN\log_2 M) + O(MN^2) + O(MN^2)$. 其中 M, N 表示距离向采样点数和脉冲回波的积累个数, Q 表示每个距离单元内 LCT 的实施次数, 即参数搜索带来的结果.

值得注意的是, Q 的大小取决于相位系数 a_{2l} 的范围与参数搜索步长. 对于 P -阶离散长度为 N 的多项式相位信号 $x(t) = \exp\{j2\pi(a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_P t^P)\}$, 为了避免相位缠绕和谱模糊, 相位系数范围满足

$$|a_p| \leq \frac{1}{2p \left(\frac{N}{2}\right)^{p-1} (\Delta t)^p}, \quad p = 1, 2, \dots, P. \quad (29)$$

那么, 在式 (21)~(23) 中回波信号模型 (LFM 信号) 应满足 [29]

$$|a_{1l}| \leq \frac{1}{2\Delta t}, \quad |a_{2l}| \leq \frac{1}{2M(\Delta t)^2}. \quad (30)$$

根据上述分析, 回波信号的相位系数的范围可以被确定, 参数搜索步长决定了估计精度和计算量. 步长越小, 精度越高, 计算量越大. 因此, 在实际中可以根据实际需求来平衡计算量和信号精度.

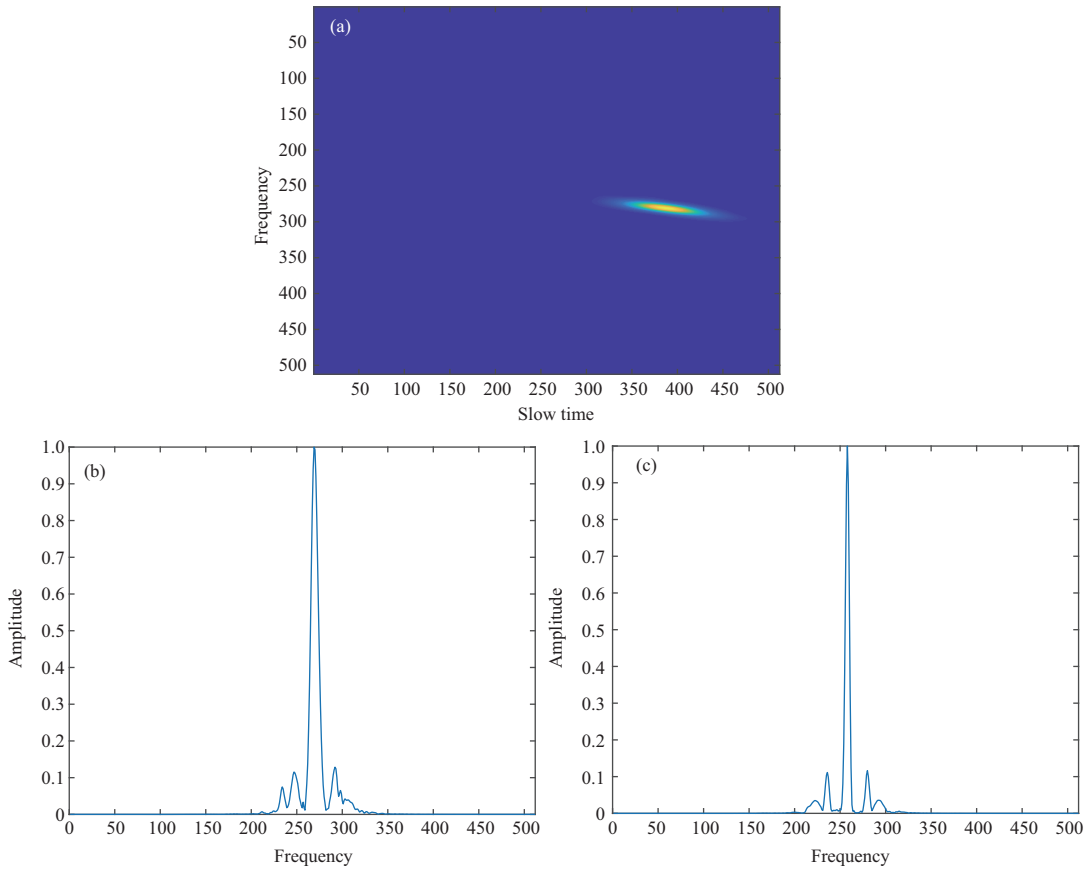


图 7 (网络版彩图) 第 192 个距离单元的回波信号

Figure 7 (Color online) The echo signal in 192-th range bin. (a) SPWVD; (b) FT domain; (c) LCT domain

4 基于 LCT 的 3-D InISAR 成像算法

2-D ISAR 图像是 3-D 目标在成像平面上的投影结果, 该结果会随着成像平面的变化而变化. 因此在不同时刻, 同一目标可能产生不同的 ISAR 图像, 这一现象不利于实际中目标的识别与分类. 3-D InISAR 成像算法克服了这一不足, 可以实现目标 3-D 几何结构的重建, 这对目标的识别与分类具有重要意义. 在 3.2 小节提出的基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法的基础上, 本节将结合干涉技术进一步提出一种 LCT 域 3-D InISAR 成像算法.

4.1 坐标重构

从 3.2 小节的式 (26)~(28) 可以发现, 3 个天线都能够得到聚焦的 2-D ISAR 图像. 尽管这些图像在 LCT 域有一个共同的附加相位 $\exp\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\widehat{\Delta R}_0^C + j\pi\frac{du^2}{b}\}$, 但可以在干涉处理时共轭相消. 因此不会影响图像干涉相位的结果. 这样, 天线 H, V 与 C 的干涉相位如下:

$$\Delta\varphi_{CH} = \text{angle}[I^{C*}(f_r, u) \cdot I^H(f_r, u)] = \frac{2\pi}{\lambda}d_H\hat{\theta}_H(t_0), \quad (31)$$

$$\Delta\varphi_{CV} = \text{angle}[I^{C*}(f_r, u) \cdot I^V(f_r, u)] = \frac{2\pi}{\lambda}d_V\hat{\theta}_V(t_0). \quad (32)$$

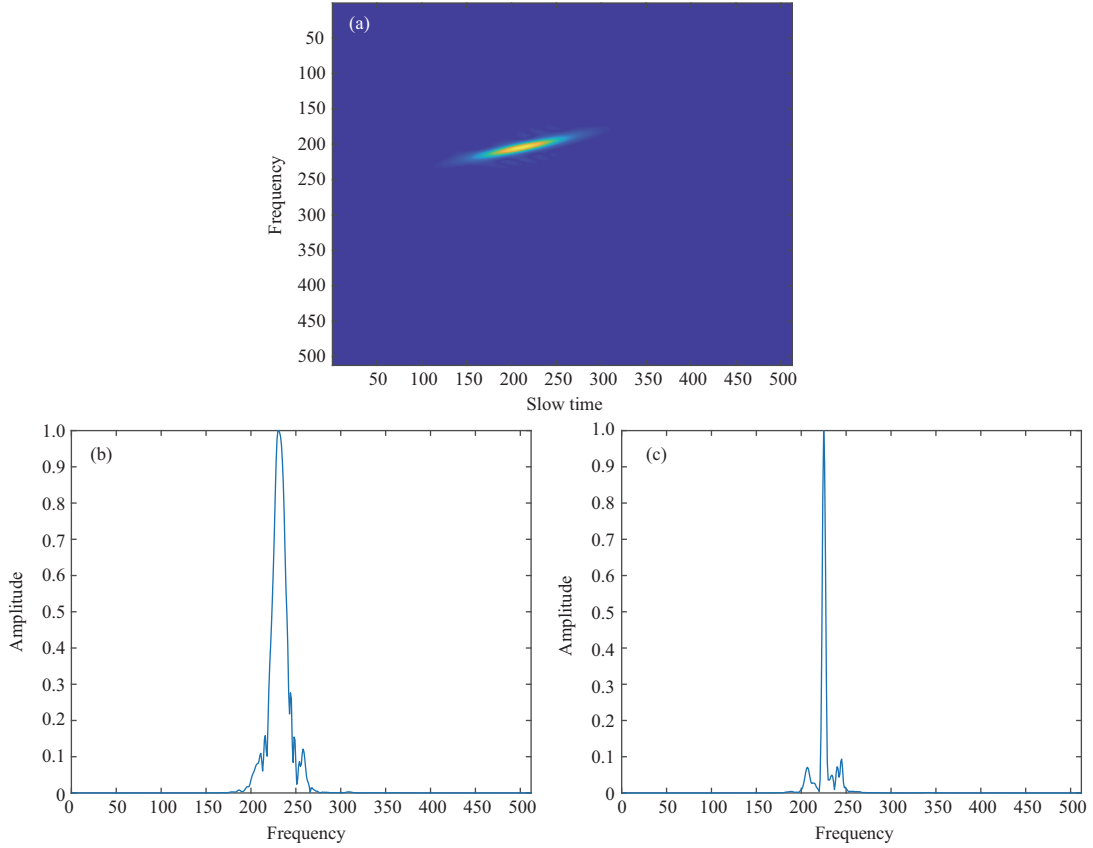


图 8 (网络版彩图) 第 228 个距离单元的回波信号

Figure 8 (Color online) The echo signal in 228-th range bin. (a) SPWVD; (b) FT domain; (c) LCT domain

对于某个散射点, 基于远场假设有 $d_H \hat{\theta}_H(t_0) \approx R_{0l}^C - R_{0l}^H$ 和 $R_{0l}^C + R_{0l}^H \approx 2R_{M_H}$, 所以

$$R_{0l}^C - R_{0l}^H = \frac{R_{0l}^{C^2} - R_{0l}^{H^2}}{R_{0l}^C + R_{0l}^H} \approx \frac{R_{0l}^{C^2} - R_{0l}^{H^2}}{2R_{M_H}} = \frac{d_H(2\eta_{1l} - d_H)}{2R_{M_H}}. \quad (33)$$

同样地,

$$R_{0l}^C - R_{0l}^V \approx \frac{d_V(2\eta_{3l} - d_V)}{2R_{N_V}}, \quad (34)$$

其中 R_{M_H}, R_{N_V} 是目标中心到两基线中点 M_H, N_V 的初始距离.

把式 (33) 和 (34) 分别代入到式 (31) 和 (32) 中, 就有散射点 P 的坐标

$$\eta_{1l} = \frac{\lambda R_{M_H} \Delta\varphi_{CH}}{2\pi d_H} + \frac{d_H}{2}, \quad (35)$$

$$\eta_{2l} = n_l \rho_r, \quad (36)$$

$$\eta_{3l} = \frac{\lambda R_{N_V} \Delta\varphi_{CV}}{2\pi d_V} + \frac{d_V}{2}. \quad (37)$$

需要说明的是, 上面重构的散射点坐标是目标坐标到参考坐标系的投影结果, 因此需要利用初始旋转矩阵变换到目标坐标系

$$[x_l, y_l, z_l]^T = \Omega_0^{-1} \cdot [\eta_{1l}, \eta_{2l}, \eta_{3l}]^T, \quad (38)$$

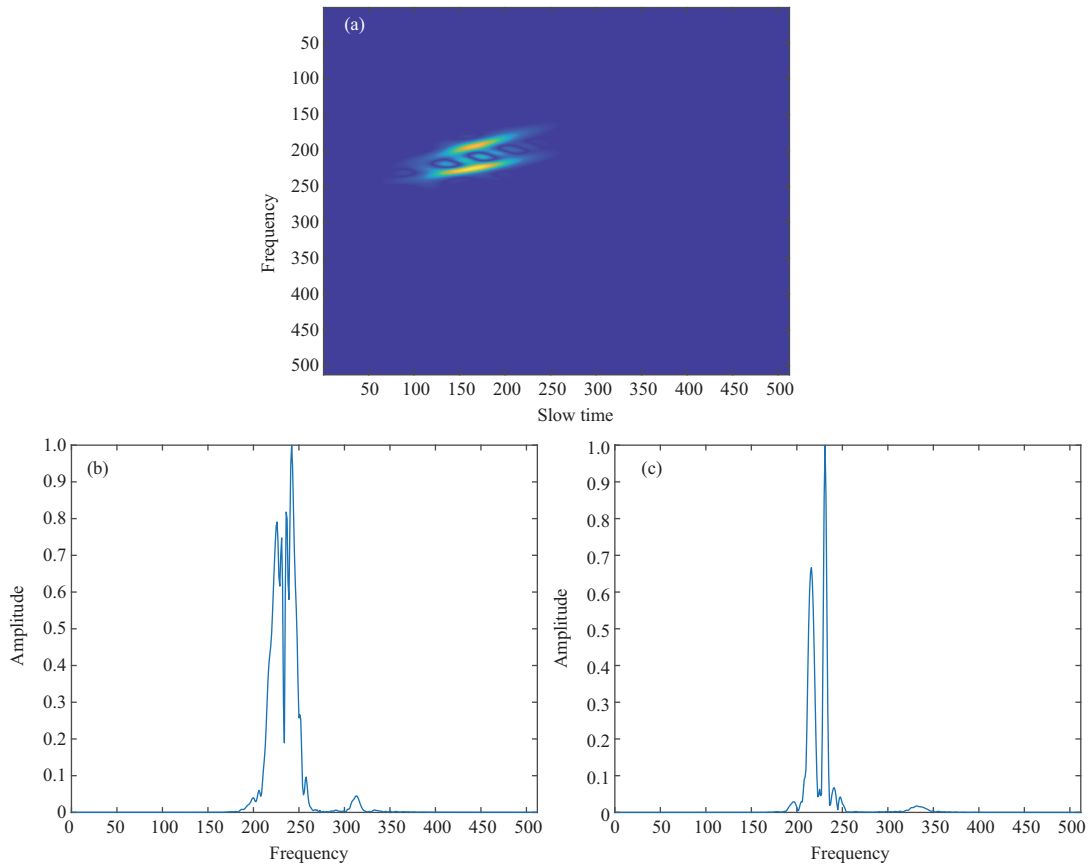


图 9 (网络版彩图) 第 256 个距离单元的回波信号

Figure 9 (Color online) The echo signal in 256-th range bin. (a) SPWVD; (b) FT domain; (c) LCT domain

从而完成复杂运动目标的 3-D 坐标重建.

4.2 基线影响分析

从式 (35) 和 (37) 可以发现, 散射点沿基线方向的高度信息可以由相位差得到. 由于相位差对比波长小的路程差也比较敏感, 所以由干涉相位得到的 3-D 坐标重构是很精确的. 但是这也有一个重要前提: 干涉相位不发生模糊. 由于时变波程差导致的相位模糊在图像对准时已进行去模糊处理, 但从上面公式也可以发现, 系统固定参数也可能导致相位模糊, 如目标尺寸、基线长度等. 不妨以雷达正视观测目标为例, 即 $x_l = \eta_{1l} - \frac{d_H}{2}$, $z_l = \eta_{3l} - \frac{d_V}{2}$, 在基于满足 $\hat{\theta}_H(t_0) = \frac{x_l}{R_M}$ 和 $\hat{\theta}_V(t_0) = \frac{z_l}{R_N}$ 的远场假设条件下, 为使得干涉相位不模糊, 则

$$|\Delta\varphi_{CH}| = \left| \frac{2\pi x_l d_H}{\lambda R_M} \right| < \pi, \quad |\Delta\varphi_{CV}| = \left| \frac{2\pi z_l d_V}{\lambda R_V} \right| < \pi. \quad (39)$$

在基线确定的情况, 目标尺寸应满足

$$x_l < \frac{\lambda R_0}{2d_H}, \quad z_l < \frac{\lambda R_0}{2d_V}, \quad (40)$$

其中 x_l , z_l 表示雷达正视时沿基线方向的高度信息. 一般情况下的雷达参数如基线长度 $d_H = 2$ m, 采用载频 $\lambda = 0.03$ m 的电磁波, 初始距离为 $R_H = 10$ km, 则 $|x_l| < 75$ m, 这对于大多数飞机及舰船目标

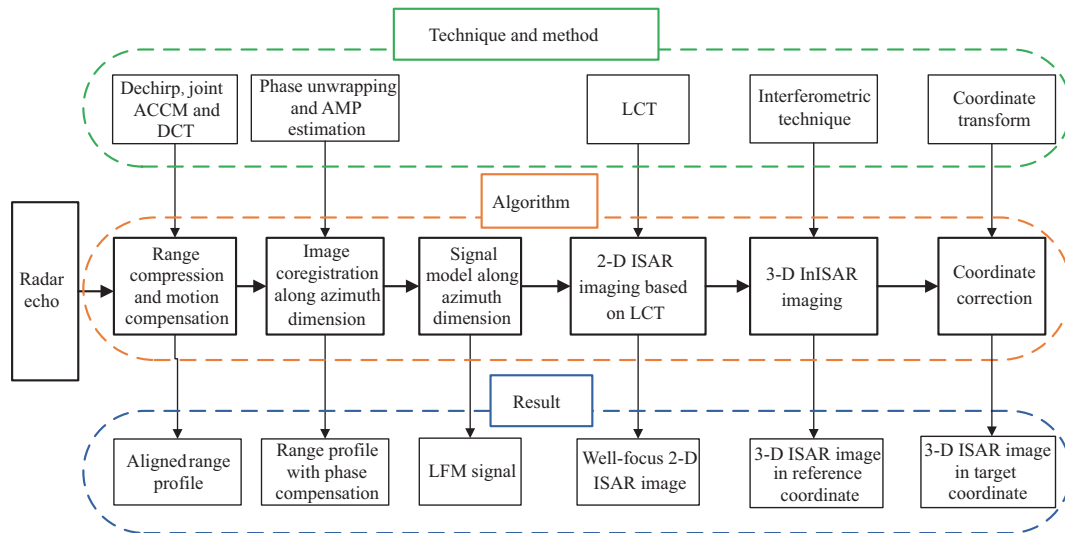


图 10 (网络版彩图) 所提 3-D InISAR 成像算法流程图

Figure 10 (Color online) Flowchart of the proposed 3-D InISAR imaging algorithm

是能够保证的. 所以, 此时不需对干涉相位再次解缠. 同时需要说明的是, 本文中仿真目标尺寸满足上述要求.

如果要对距离更近的或更大型的目标进行成像, 则可以通过适当缩短基线长度来减小相位干涉误差或避免相位模糊. 在 InISAR 成像中, 由于天线之间的距离, 使天线接收信号之间的相干性受到影响, 从而 2-D ISAR 图像相位干涉结果也存在一定误差. 从式 (39) 也可以看到, 较短的基线长度可增加信号的相干性, 最小化视角范围的变化, 从而避免相位模糊. 因此, 相对来讲, 短基线有利于 3-D 目标重构. 一般地, 为避免因基线长度造成干涉相位模糊, 基线需满足

$$d_H < \frac{\lambda R_0}{2x_l}, \quad d_V < \frac{\lambda R_0}{2z_l}. \quad (41)$$

另一方面, 根据相位误差与基线长度成反比^[31], 即基线长度越大, 相位测量误差越小, 从而实现目标高度或宽度的高精度重构. 因此在实际工程中, 结合具体应用场景来确定合适的基线长度.

4.3 基于 LCT 的 3-D InISAR 成像算法

本小节主要总结基于 LCT 的 3-D InISAR 成像算法, 其成像流程如图 10, 对应的具体实施步骤如下:

- 步骤 1. 实施 Dechirp 技术和 KT 处理距离压缩和跨距离单元徙动;
- 步骤 2. 采用联合 ACCM 和 DCT 方法补偿径向运动, 得到对齐的 1-D 距离像, 即式 (15)~(17);
- 步骤 3. 通过 AMP 方法和多项式函数估计并拟合角运动参数 θ_H 和 θ_V , 并在此过程中完成波程差造成的相位缠绕. 随后补偿相位差来实现回波信号的方位向对齐, 即式 (19) 和 (20);
- 步骤 4. 将每一个距离单元的回波信号建模为多分量 LFM 信号, 即式 (21)~(23);
- 步骤 5. 实施基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法, 得到多个通道的 2-D 高分辨 ISAR 图像, 即式 (26)~(28);

步骤 6. 采用 CLEAN 技术提取天线 C 的主散射点, 并利用干涉技术获取多个通道 ISAR 图像之间的干涉相位式 (31) 和 (32), 从而得到参考系 T_ξ 中重构散射点坐标;

表 1 雷达系统参数

Table 1 Parameters of the radar system

Parameter	Center frequency (GHz)	Bandwidth (MHz)	Pulse width (μs)	Sampling frequency (MHz)
Value	10	200	20	25.6
Parameter	Observation time (s)	PRF (Hz)	Range bin number	Pulse number
Value	2	256	512	512

表 2 1-D 旋转参数

Table 2 1-D rotation parameters of the ship target with the same baselines

Parameter	Roll	Pitch	Yaw
Amplitude (rad)	0	0	$6\pi/180$
Rotational period (s)	17	9	15
Angular velocity (rad/s)	$2\pi/17$	$2\pi/9$	$2\pi/15$

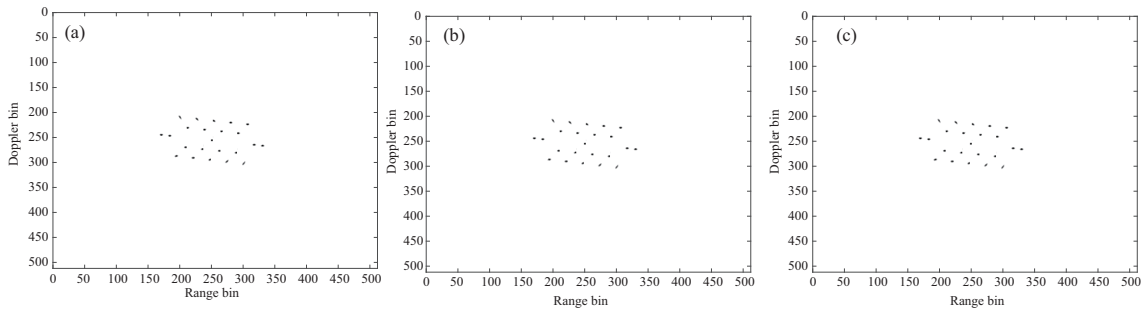


图 11 1-D 旋转运动的 ISAR 成像

Figure 11 The ISAR images of the ship target with 1-D rotation. (a) Antenna C; (b) antenna H; (c) antenna V

步骤 7. 实施坐标变换, 将参考系统 T_{ξ} 中散射点坐标变换到目标系统 T_{xyz} , 得到目标的 3-D 坐标, 从而实现目标重构.

4.4 仿真实验

为了验证所提的 3-D InISAR 成像算法对目标 3-D 重构的性能, 本小节将利用所提算法对不同基线、不同运动状态的舰船目标进行几何重构与分析. 对于图 3 中仿真舰船目标, 其径向运动速度和航行方向与 3.2 小节设置的参数一致. 在 L-型的天线阵列下, 雷达系统的参数如表 1 所示.

实验 1. 基线相同, 1-D 旋转运动. 当舰船目标在较为平静的海面上航行时只产生 1-D 旋转运动, 本实验假设只有偏航, 其运动参数如表 2 所示. 雷达系统中正交基线长度为 $d_H = d_V = 2.6$ m, 其满足干涉相位不缠绕条件 (41). 为更清晰地说明 3-D 重构效果, 首先利用基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法对 3 个天线的回波进行处理, 并得到聚焦 2-D ISAR 图像, 如图 11(a)~(c). 在 2-D ISAR 成像过程中, LCT 作为一种多参数线性变换, 能够完好地保存各个图像的相位信息. 因此经过提出的 3-D InISAR 成像算法可以得到目标的 3-D 几何重构结果如图 12 所示. 图 12(a)~(c) 给出了目标的不同角度的三视图即俯视图、侧视图和正视图, 可进一步揭示目标的结构特征. 图 12(d) 是目标的 3-D 坐标重建结果. 尽管存在个别不匹配散射点, 但不影响目标整体结构特征. 这表明所提算法可以较好地完成目标重构, 可为进一步地目标识别与分类提供支持.

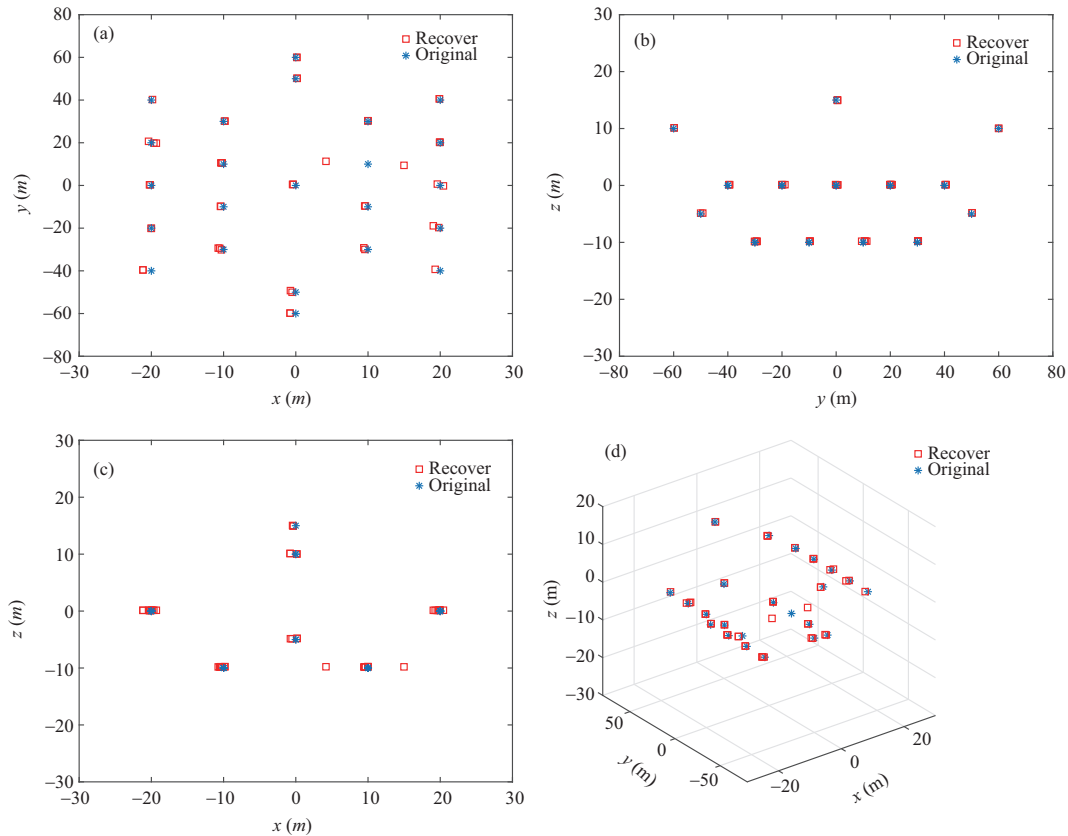


图 12 (网络版彩图) 1-D 旋转运动下目标不同视角重构

Figure 12 (Color online) The reconstruction of the ship target with 1-D rotation from different views. (a) x - y plane; (b) y - z plane; (c) x - z plane; (d) 3-D reconstruction

实验 2. 基线相同, 3-D 旋转运动. 当在高海况下, 舰船目标的运动受到海面波动影响较大, 将同时出现横摇、纵摆和偏航的 3-D 旋转运动, 表 3 是目标的旋转运动参数. 在相同基线长度 $d_H = d_V = 2.6$ m 下, 对于图 3 中目标, 基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法可得到 3 个天线的 2-D 成像结果如图 13(a)~(c) 所示. 从图中不难发现, 所提的 2-D ISAR 成像算法针对复杂运动目标仍然能够得到聚焦图像, 这是由于 LCT 对非平稳的 LFM 类型的回波信号仍然具有很好的时频聚集能力. 经过所提的 InISAR 成像算法, 图 14 是目标三视图以及 3-D 几何结构的重建结果.

对比图 13 与 14 可以发现, 尽管所提算法能够得到聚焦的 2-D ISAR 图像, 但目标图像已发生一定的形变. 而图 14 中的三维重构结果, 仍能够较好地保持目标形状不变, 这表明所提算法在复杂场景中较好的重构性能. 同时需要注意的是, 在 3-D 重构结果中, 在真实散射点附近也出现了一些虚假散射点. 这是由于频谱旁瓣互相干扰及 CLEAN 技术中清除半径的限制, 被清除的频谱谱峰可能对应某些虚假散射点或真实散射点, 从而出现虚假散射点现象. 因此在实际应用中, 仍需对回波信号谱峰进行旁瓣抑制来提高重构精度, 进一步发挥 3-D InISAR 成像算法在目标识别与分类中的重要作用.

实验 3. 基线不同, 3-D 旋转运动. 在满足干涉相位不模糊条件下, 本实验利用不同基线长度 $d_H = 1.2$ m, $d_V = 3.2$ m 来验证基线长度对目标 3-D 重构结果精度的影响即: 基线越长重构误差越小, 基线越短, 重构误差越大. 表 4 是舰船目标的运动参数. 基于本文所提成像算法, 图 15 是不同天线的聚焦

表 3 相同基线, 3-D 旋转参数

Table 3 3-D rotation parameters of the ship target with the same baselines

Parameter	Roll	Pitch	Yaw
Amplitude (rad)	$4\pi/180$	$2\pi/180$	$6\pi/180$
Rotational period (s)	17	9	15
Angular velocity (rad/s)	$2\pi/17$	$2\pi/9$	$2\pi/15$

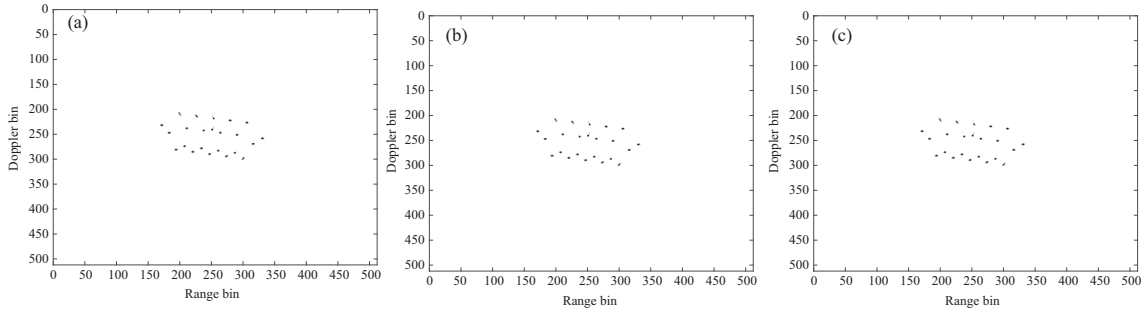


图 13 3-D 旋转运动的 ISAR 图像 (相同基线)

Figure 13 The ISAR images of the ship target with 3-D rotation (the same baselines). (a) Antenna C; (b) antenna H; (c) antenna V

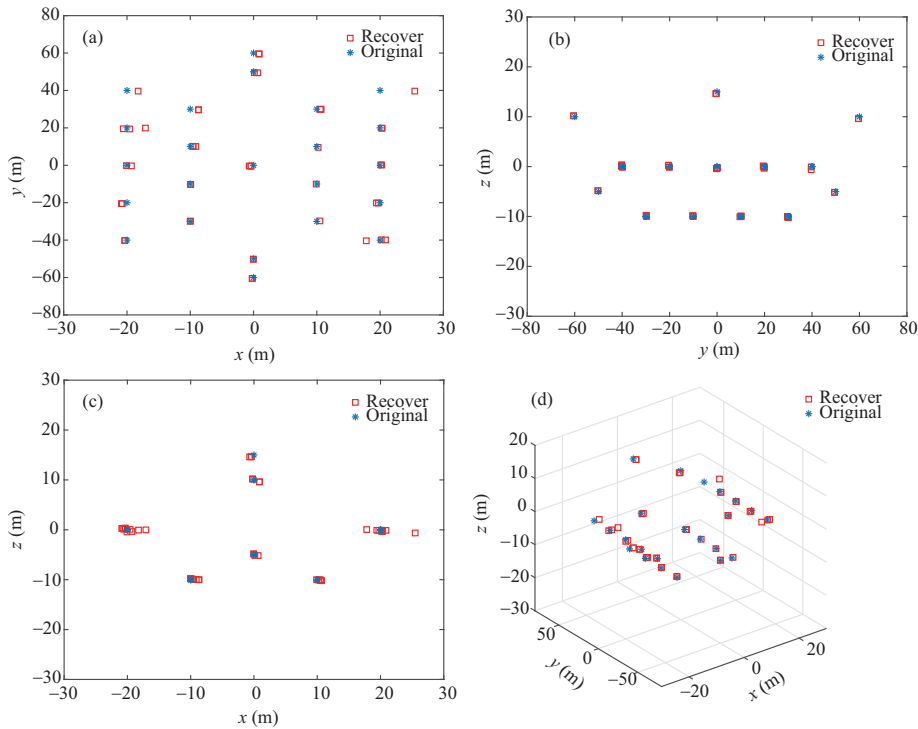


图 14 (网络版彩图) 3-D 旋转运动下目标不同视角重构 (相同基线)

Figure 14 (Color online) The reconstruction of the ship target with 3-D rotation from different views (the same baselines). (a) x - y plane; (b) y - z plane; (c) x - z plane; (d) 3-D reconstruction

表 4 不同基线, 3-D 旋转参数

Table 4 3-D rotation parameters of the ship target with different baselines

Parameter	Roll	Pitch	Yaw
Amplitude (rad)	$5\pi/180$	$3\pi/180$	$4\pi/180$
Rotational period (s)	12	7	14
Angular velocity (rad/s)	$2\pi/12$	$2\pi/7$	$2\pi/14$

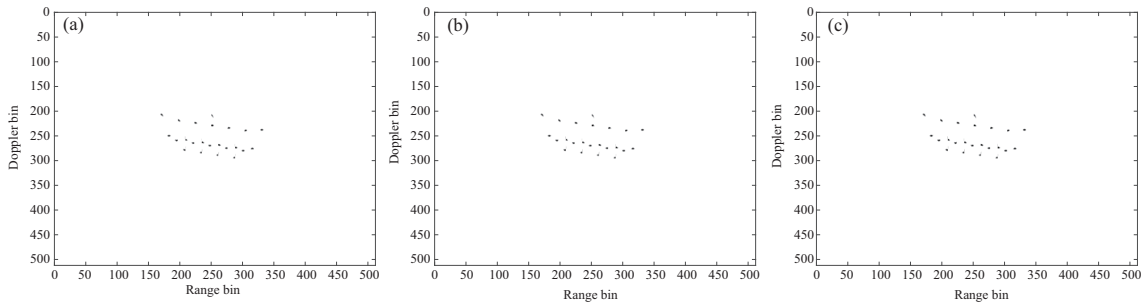


图 15 3-D 旋转运动的 ISAR 图像 (不同基线)

Figure 15 The ISAR images of the ship target with 3-D rotation (different baselines). (a) Antenna C; (b) Antenna H; (c) Antenna V

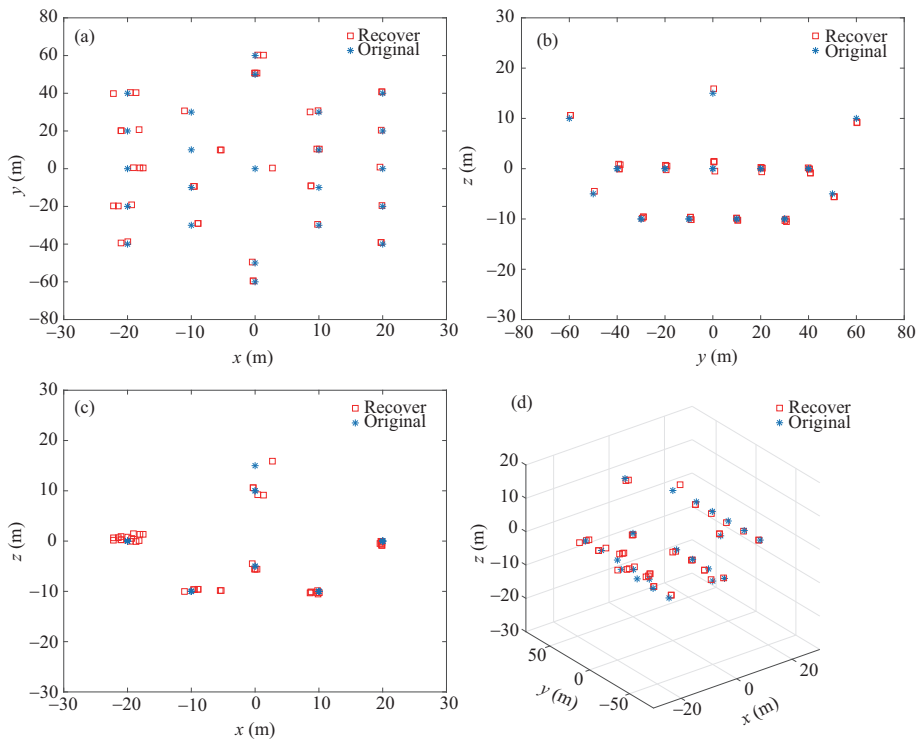


图 16 (网络版彩图) 3-D 旋转运动下目标不同视角重构 (不同基线)

Figure 16 (Color online) The reconstruction of the ship target with 3-D rotation from different views (different baselines). (a) x - y plane; (b) y - z plane; (c) x - z plane; (d) 3-D reconstruction

的 2-D ISAR 图像. 图 16 是 3-D 重构结果. 基线 $d_H = 1.2$ m 对应散射点的 x 轴坐标, 所提取的散射点中心在 x 轴方向明显偏离真实散射点中心. 同时对比实验 1 和 2 中 $d_H = 2.6$ m 时 x 坐标重构效果可以发现, 在满足干涉相位不模糊条件下, 基线越短, 导致的重构误差越大. 基线 $d_V = 3.2$ m 对应散射点 z 轴坐标, 重构的散射点中心在 z 轴方向上优于在 x 轴方向重构效果, 这是由于较长基线能够实现更精确坐标重构. 同时, 此实验与相同基线的实验 1 和 2 相比, 虽然重构结果出现较多的不匹配散射点, 但基本保存了舰船目标的整体轮廓, 在有先验结构信息的情况下, 仍可以实现对目标的有效识别.

从图 12, 14 和 16 的结果中可以发现, 提出的 3-D InISAR 成像算法不管是在 1-D 旋转还是更复杂的 3-D 旋转运动下均可以实现目标较高精度的 3-D 坐标重构, 证明了所提 InISAR 算法在复杂运动目标识别和分类中的巨大潜力.

5 结论

本文针对复杂运动目标提出一种基于 LCT 的高分辨 3-D InISAR 成像算法. 在 L -型天线阵列的 InISAR 装置下, 首先分析了目标复杂运动, 得到了雷达回波信号. 其次在完成运动补偿和图像对准后, 将方位向回波信号建模为 LFM 信号. 结合 LCT 在处理 LFM 信号时的独特优势, 提出了基于 LCT 的 2-D ISAR 成像算法. 仿真实验和时频聚集性分析说明了该算法能够产生聚焦 2-D ISAR 图像. 最后, 由于 LCT 在成像过程中不会破坏其相位信息, 本文结合干涉技术提出了 LCT 域新型 3-D InISAR 成像算法. 同时, 对所提算法计算量和基线长度影响进行了分析. 不同的仿真实验验证了所提算法的重构性能.

参考文献

- 1 Berizzi F, Mese E D, Diani M, et al. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous doppler technique: modeling and performance analysis. *IEEE Trans Image Process*, 2001, 10: 1880–1890
- 2 Martorella M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2008, 44: 281–294
- 3 Zheng J, Su T, Zhu W, et al. ISAR imaging of nonuniformly rotating target based on a fast parameter estimation algorithm of cubic phase signal. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2015, 53: 4727–4740
- 4 Gao Y, Xing M, Zhang Z, et al. ISAR Imaging and cross-range scaling for maneuvering targets by using the NCS-NLS algorithm. *IEEE Sens J*, 2019, 19: 4889–4897
- 5 Li X. Progress in radar imaging for maneuvering targets. *Sci Sin Inform*, 2021, 51: 305–324 [黎湘. 复杂运动目标雷达成像研究进展. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51: 305–324]
- 6 Ma C Z, Yeo T S, Tan H S, et al. Three-dimensional ISAR imaging using a two-dimensional sparse antenna array. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2008, 5: 378–382
- 7 Zhu Y T, Su Y. A type of M^2 -transmitter N^2 -receiver MIMO radar array and 3D imaging theory. *Sci Sin Inform*, 2011, 41: 1495–1506 [朱宇涛, 粟毅. 一种 M^2 发 N^2 收 MIMO 雷达平面阵列及其三维成像方法. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41: 1495–1506]
- 8 Martorella M, Stagliano D, Salvetti F, et al. 3D interferometric ISAR imaging of noncooperative targets. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2014, 50: 3102–3114
- 9 Wang G Y, Xia X G, Chen V C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers. *IEEE Trans Image Process*, 2001, 10: 436–447
- 10 Iwamoto M, Kirimoto T. A novel algorithm for reconstructing three-dimensional target shapes using sequential radar images. In: *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney*, 2001. 1607–1609
- 11 Given J A, Schmidt W R. Generalized ISAR-part II: interferometric techniques for three-dimensional location of scatterers. *IEEE Trans Image Process*, 2005, 14: 1792–1797
- 12 Suwa K, Wakayama T, Iwamoto M. Three-dimensional target geometry and target motion estimation method using multistatic ISAR movies and its performance. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49: 2361–2373

- 13 Sun S, Jiang Y. Three-dimensional shipborne inverse synthetic aperture radar imaging based on single receiver. *Remote Sens Lett*, 2017, 8: 320–329
- 14 Lv Q, Su T, Zheng J, et al. Three-dimensional interferometric inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering target based on the joint cross modified Wigner-Ville distribution. *J Appl Remote Sens*, 2016, 10: 015007
- 15 Ng B W, Tran H, Martorella M, et al. Estimation of the total rotational velocity of a non-cooperative target with a high cross-range resolution three-dimensional interferometric inverse synthetic aperture radar system. *IET Radar Sonar Nav*, 2017, 11: 1020–1029
- 16 Wang Y, Chen X. 3-D interferometric inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2018, 56: 3693–3708
- 17 Salvetti F, Martorella M, Giusti E, et al. Multiview three-dimensional interferometric inverse synthetic aperture radar. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2019, 55: 718–733
- 18 Rong J, Wang Y, Han T. Interferometric ISAR imaging of maneuvering targets with arbitrary three-antenna configuration. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2020, 58: 1102–1119
- 19 Wang Y, Chen X. 3-D InSAR imaging of the ship target based on joint cross s-method algorithm. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2019, 16: 1080–1084
- 20 Xin H C, Bai X, Song Y E, et al. ISAR imaging of target with complex motion associated with the fractional fourier transform. *Digital Signal Process*, 2018, 83: 332–345
- 21 Sun Y N, Li B Z. Sliding discrete linear canonical transform. *IEEE Trans Signal Process*, 2018, 66: 4553–4563
- 22 Huang X, Zhang L, Li S, et al. Radar high speed small target detection based on keystone transform and linear canonical transform. *Digital Signal Process*, 2018, 82: 203–215
- 23 Shi J, Liu X, Zhao Y, et al. Filter design for constrained signal reconstruction in linear canonical transform domain. *IEEE Trans Signal Process*, 2018, 66: 6534–6548
- 24 Liu M J, Gao M G, Fu X J. A novel range alignment algorithm for real time ISAR imaging. In: *Proceeding of the 8th International Conference on Signal Processing*, Guilin, 2006. 1–4
- 25 Zhang Q, Yeo T S, Du G, et al. Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 292–300
- 26 Wang Y, Rong J, Han T. Novel approach for high resolution ISAR/InSAR sensors imaging of maneuvering target based on peak extraction technique. *IEEE Sens J*, 2019, 19: 5541–5558
- 27 Fornaro G, Franceschetti G, Lanari R. Interferometric SAR phase unwrapping using Green’s formulation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1996, 34: 720–727
- 28 Tian B, Lu Z, Liu Y, et al. Review on interferometric ISAR 3D imaging: concept, technology and experiment. *Signal Process*, 2018, 153: 164–187
- 29 Bai X, Tao R, Wang Z, et al. ISAR imaging of a ship target based on parameter estimation of multicomponent quadratic frequency-modulated signals. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, 52: 1418–1429
- 30 Kalra M, Kumar S, Das B. Target detection using smooth pseudo Wigner-Ville distribution. In: *Proceeding of IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*, Thiruvananthapuram, 2018. 6–10
- 31 Zhang D C. Research on the key techniques of interferometric inverse sythetic aperture radar imaging. Dissertation for Ph.D. Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009 [张冬晨. InSAR 三维成像的关键技术研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学与技术大学, 2009]

3-D InISAR imaging for targets with complex motion based on linear canonical transform

Hongcai XIN¹ & Bingzhao LI^{2,3*}

1. *Department of Cryptology Science and Technology, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China;*

2. *School of Mathematics and Statistics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

3. *Beijing Key Laboratory on Mathematical Characterization Analysis and Application of Complex Information, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

* Corresponding author. E-mail: li_bingzhao@bit.edu.cn

Abstract The two-dimensional inverse synthetic aperture radar (2-D ISAR) image is a 2-D projection of the three-dimensional (3-D) shape of the target, and it is difficult to meet the demand of recognition and classification, especially of targets with complex motion. Recently, interferometric ISAR (InISAR) has been receiving increasing attention since it can reconstruct the 3-D shape of the target with high resolution. This paper proposes a novel 3-D InISAR imaging algorithm based on linear canonical transform (LCT) for targets with complex motion. In this method, the initial echo signal model is generated after analyzing the complex motion of the target. After motion compensation and image coregistration, the azimuth echo is modeled as linear frequency modulation (LFM) signal. Given the time-frequency characteristics of LFM signal, then a new 2-D ISAR imaging algorithm based on LCT is developed to obtain well-focused and multi-channel 2-D ISAR images as well as preserve the phase information of images. Finally, employing the interferometric technique, a novel 3-D InISAR imaging method is proposed and the high-resolution 3-D shape of the target can be reconstructed. In addition, the time-frequency concentration, moderate computation cost and effect of baseline are discussed, and different simulation experiments and results verify the superior performance of the proposed method.

Keywords target with complex motion, InISAR, linear canonical transform, imaging algorithm, three-dimensional coordinate reconstruction