

DOI: 10.7652/xjtuxb201412016

利用多通道联合稀疏重建的干涉 逆合成孔径雷达三维成像算法

陈倩倩, 张磊, 徐刚, 邢孟道, 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对单通道超分辨成像算法重建的超分辨图像间散射点的位置出现偏差的问题,提出了一种利用多通道联合稀疏重建的干涉逆合成孔径雷达(MCJSR-InISAR)三维成像算法。首先利用联合包络对齐算法校正目标平动对应的包络时延,再利用联合自聚焦算法实现平动补偿的初相校正,对来自不同天线的回波信号的距离差进行补偿,然后利用 MCJSR 进行超分辨成像,同时利用快速傅里叶变换提高运算效率,最后利用水平及俯仰干涉相位信息实现机动目标的 InISAR 三维成像。MCJSR-InISAR 算法具有更高的强散射中心重建精度,能够对通道间的相对相位信息进行有效的保持。实测数据表明,与单通道超分辨成像算法相比,MCJSR-InISAR 算法成像结果的熵值降低了约 0.17,且运算复杂度降低了 $O(10^5)$ 。

关键词: 干涉逆合成孔径雷达;联合稀疏重建;三维成像;机动目标

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)12-0100-07

A Three-Dimensional Imaging Algorithm of Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Using Multichannel Joint Sparse Recovery

CHEN Qianqian, ZHANG Lei, XU Gang, XING Mengdao, BAO Zheng

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel three-dimensional (3-D) imaging algorithm of interferometric inverse synthetic aperture radar (InISAR) using multichannel joint sparse recovery (MCJSR), named MCJSR-InISAR, is proposed to improve the problem that the super-resolution images recovered by the single channel super-resolution imaging algorithm do not necessarily share the same positions of the scattering centers. The combined range alignment approach is used to correct the envelope delay caused by the target's translational motion, and then the combined phase adjustment approach is employed to complete the phase compensation of translational motion. The range differences between two echo signals received by different antennas are then compensated. Then, MCJSR is used for super-resolution imaging, and the computational efficiency of the proposed algorithm is improved by using the fast Fourier transform (FFT). Finally, a 3-D InISAR imagery of the maneuvering target is obtained by using both the horizontal and the pitching interferometric phase information. The MCJSR-InISAR algorithm can improve the recovery precision of the strong centers in the target scattering field, and preserve effectively the relative phase information between different channels. Experimental results on real-measured data and comparisons with the

收稿日期: 2014-03-21。 作者简介: 陈倩倩(1984—),女,博士生;邢孟道(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61301280,61001211)。

网络出版时间: 2014-10-31 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20141031.1643.018.html>

single channel super-resolution imaging algorithm show that the proposed algorithm decreases the entropy of the resulting image by about 0.17, and reduces the computational complexity by about $O(10^5)$.

Keywords: interferometric inverse synthetic aperture radar; joint sparse recovery; three-dimensional imaging; maneuvering target

干涉逆合成孔径雷达(interferometric inverse synthetic aperture radar, InISAR)^[1-4]成像技术采用三天线相位干涉的方法获取目标的三维视图,与逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)获得的三维空间目标在距离多普勒平面上的二维投影图像相比,更有利于目标的识别,且信号处理过程比较简单,系统易于实现,因而受到了广泛的关注。

为了能够获取高方位分辨率,需要对回波信号进行长时间积累。然而,由于 ISAR 目标的机动性,对目标进行长时间驻留观测,回波信号可能存在很强的多普勒时变,并且容易受到外界环境的干扰,这会增加 ISAR 成像处理的复杂度,并使得图像出现散焦情况。相比而言,短相干处理时间(coherent processing interval, CPI)内,机动目标的运动接近平稳且目标的散射特性也相对稳定,因此在短 CPI 条件下,更易于实现机动目标的实时成像和识别^[5]。但是,在短 CPI 内,由于回波次数较少,利用传统的 ISAR 成像方法如距离多普勒(range-Doppler, RD)算法,得到的图像方位分辨率较低,因此需要采用超分辨成像算法提高分辨率。传统的基于参数模型的超分辨算法,如 Burg 算法、RELAX 算法等,对噪声和模型误差比较敏感,且观测数据长度也制约了算法的性能^[6]。压缩感知(compressive sensing, CS)理论指出:在一定条件下,一个未知稀疏信号可以通过求解一个最小 l_1 -范数约束优化问题,实现从低维观测数据重建高维目标信号^[7]。利用 CS 理论能够克服传统超分辨成像算法的缺点,获得更好成像质量的高分辨率图像。因此,自被提出至今,CS 理论在超分辨雷达成像方面得到了广泛的应用^[8-9]。

利用 ISAR 图像的稀疏性,文献[10]提出基于稀疏约束模型的 InISAR 三维成像算法,此算法的超分辨成像是各个天线的回波信号进行单独处理,忽略了一个重要特性,即 InISAR 系统中的多通道回波信号之间具有很强的相关性,从而降低了干涉相位信息的估计精度。因此,针对短 CPI 内的机动目标,本文提出利用多通道联合稀疏重建(multi-channel joint sparse recovery, MCJSR)的 InISAR (MCJSR-InISAR)三维成像算法。该算法通过建立

联合稀疏约束最优化模型进行超分辨成像,有效地利用了多通道回波信号间的相关性,提高了 ISAR 图像中强散射中心的重建精度,并有效地保持了通道间的相对相位信息,从而获得较高精度的干涉相位信息,实现高质量的目标 InISAR 三维成像。此外,对最优化问题进行求解时利用快速傅里叶变换(FFT)提高算法的运算效率,保证算法的高效性。

1 InISAR 回波信号模型

为获得目标的三维图像,InISAR 成像系统包含多个天线,这里以水平方向 2 个天线对运动目标观测时的成像几何模型为例,俯仰方向的成像几何模型与之类似。图 1 给出了天线与目标的几何关系。天线 A 与 B 之间的基线长度为 L 。在雷达照射期间,目标从位置 1 运动到位置 2, $\Delta\theta(t_m)$ 表示散射点 $p(x, y)$ 从位置 1 到 2 时相对雷达的姿态角变化。 $R_{Ao'}$ 和 $R_{Bo'}$ 分别表示在位置 1 处目标旋转中心 o' 到天线 A 与 B 的距离。

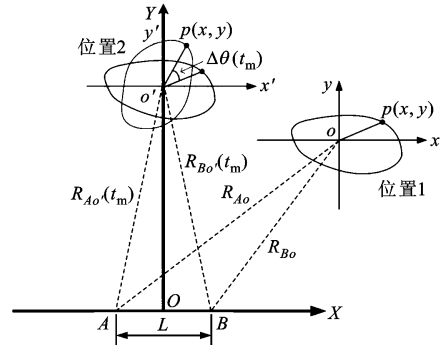


图 1 天线与目标的几何关系

假设天线 A 发射线性调频信号 $S(t_k) = \text{rect}\left[\frac{t_k}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_c t_k + \frac{\gamma}{2} t_k^2\right)\right]$, 其中 t_k 表示快时间, T_p 为脉宽, f_c 为载频, γ 为调频率, $\text{rect}[\cdot]$ 表示窗函数。天线 A 和 B 同时接收回波信号,经过距离脉冲压缩后的信号表达式为

$$S_l(t_k, t_m) = \iint_{(x, y) \in G} \sigma(x, y) \text{sinc}\left[B\left(t_k - \frac{2R_{lp}(t_m)}{C}\right)\right] \exp\left[-j4\pi \frac{R_{lp}(t_m)}{\lambda}\right] dx dy \quad (1)$$

式中: $l=A, B$; $\sigma(x, y)$ 表示目标上散射点 p 的散射系数; G 表示目标所占区域; B 为信号带宽; $0 \leq t_m \leq T_a$ 为慢时间, T_a 表示 CPI 长度; λ 为波长; C 为光速; $R_{lp}(t_m)$ 表示点 p 到天线 A 和 B 的瞬时距离, 表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} R_{Ap}(t_m) &= R_{Ao'} + R_T + y \cos(\Delta\theta(t_m)) + x \sin(\Delta\theta(t_m)) \approx R_{Ao'} + R_T + y + x \Delta\theta(t_m) \\ R_{Bp}(t_m) &= R_{Bo'} + R_T + y \cos(\Delta\theta(t_m)) + x \sin(\Delta\theta(t_m)) \approx R_{Bo'} + R_T + y + x \Delta\theta(t_m) + L \Delta\theta(t_m) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在短 CPI 条件下, 机动目标运动近似平稳, 则 $\Delta\theta(t_m) \approx \omega t_m$, 其中 ω 为目标的转动速度, $y + x \Delta\theta(t_m)$ 表示散射点 p 相对雷达的转动引起的距离变化量, R_T 表示目标相对雷达的径向运动引起的变化量。为了尽可能减小通道间图像的差异, 提高干涉相位的估计精度, 以天线 A 的回波信号作为参考, 采用联合包络对齐和联合自聚焦的方法对平动进行补偿^[3]。 $L \Delta\theta(t_m)$ 表示目标整体相对于天线 A 与 B 转动引起的波程差, 这一项会使得生成的 ISAR 图像不能配准, 可以利用文献[4]中所提出的方法, 通过估计出目标的角运动参数, 补偿目标整体的角运动, 即补偿该波程差, 得到 2 幅配准的 ISAR 图像。另外, 当目标尺寸较大时可能存在越距离单元徙动现象, 可利用 Keystone 变换对其进行校正^[11]。此时, 经过补偿后的信号表达式变为

$$S_l(t_k, t_m) \approx \iint_{(x,y) \in G} \sigma'_l(x, y) \text{sinc} \left[B \left(t_k - \frac{2(R_{Ao'} + y)}{C} \right) \right] \exp(-j4\pi f_p t_m) dx dy \quad (3)$$

式中: $f_p = \frac{2x\omega}{\lambda}$ 表示第 p 个散射点的多普勒频率。

对式(3)的方位向作快速傅里叶变换, 可以得到 ISAR 图像, 2 幅 ISAR 图像上对应的散射点 p 的散射系数可表示为

$$\sigma'_l(x, y) = \sigma(x, y) \exp \left[-j \frac{4\pi(R_{Ao'} + y)}{C} \right] \quad (4)$$

由于雷达到目标的距离远远大于目标尺寸和基线长度, 将式(4)共轭相乘后得到

$$\sigma'_B(x, y) \sigma'^*_A(x, y) \approx \sigma^2(x, y) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{2xL}{R_{Ao'} + R_{Bo'} + y} \right) \right] \quad (5)$$

根据式(5)中的相位, 可以得到散射点相对原点 O 的水平向真实位置信息, 同理可得散射点俯仰向的真实位置信息, 从而得到目标的三维视图。

2 多通道联合稀疏约束超分辨成像

对机动目标而言, 在长 CPI 内, 回波信号可能存在很强的多普勒时变, 这会增加 ISAR 成像处理的复杂度。相比之下, 由于短 CPI 内目标运动接近平稳且目标的散射特性也相对稳定, 对目标进行短驻留时间观测更易于实时成像。因此, 基于第 1 节所述的回波信号模型, 针对短 CPI 内的机动目标, 本文提出一种高质量的三维 InISAR 成像方法。

2.1 联合稀疏约束最优化模型

在短 CPI 内, 由于回波次数较少, 距离多普勒成像算法所得的图像方位分辨率较低, 需要采用超分辨成像算法提高分辨率。在 ISAR 图像中, 目标散射场的绝大部分能量仅由少数强散射点贡献, 而且强散射中心仅占整个成像平面非常少的像素单元, 这说明 ISAR 图像具有很强的稀疏性^[6,8]。因此, 基于 ISAR 图像的稀疏性, 利用 CS 理论可以得到更好成像质量的超分辨 ISAR 图像^[9,12]。考虑到噪声的影响, 式(3)的回波信号写成矩阵形式为

$$\begin{aligned} s_l &= \Phi a_l + n_l; \\ \Phi &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \varphi & \cdots & \varphi^{\bar{N}-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \varphi^{N-1} & \cdots & \varphi^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}_{N \times N} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: s_l 表示通道 l 所得的观测矩阵, 其维数为 $N \times M$, N 表示用于 RD 成像的脉冲个数, M 表示距离向的采样点数; Φ 表示维数为 $N \times \bar{N}$ ($N < \bar{N}$, $\bar{N}$ 表示方位向超分辨重建后的脉冲个数)的部分傅里叶变换矩阵; $\varphi = \exp \left[-j \frac{2\pi}{N} \right]$; a_l 表示通道 l 目标散射

点复系数矩阵; n_l 为加性噪声矩阵。

文献[10]中指出, 根据贝叶斯 CS, 利用最大后验概率估计法, a_l 可利用下面的稀疏约束最优化问题进行求解

$$\hat{a}_l = \arg \min \{ \| s_l - \Phi a_l \|_2^2 + \mu_l \| a_l \|_1 \} \quad (7)$$

式中: $\| \cdot \|_q$ 表示 q -范数; μ_l 为稀疏约束系数, 用于平衡图像稀疏度和估计误差精度间的关系, 需要合理选择 μ_l 的值以保证恢复数据的精确性^[12]。此方法的超分辨图像是对多通道回波信号进行单独处理获取的。值得注意的是, 散射点的位置信息是通过 InISAR 系统中相邻天线所得的 2 幅 ISAR 图像中对应散射点的相位差估计所得, 换言之, 为了获得高质量的目标三维视图, 通道间的相对相位信息保持非常重要。此外, 散射点在 InISAR 各通道所得

的 ISAR 图像中的分布相同,即多通道回波信号间有较强的相关性。然而,单通道稀疏约束最优化算法忽略了这一特性,使得重建的超分辨图像间散射点的位置分布出现偏差,从而破坏了通道间的相对相位信息,降低了干涉相位信息的估计精度。因此,本文提出一种改进的超分辨成像算法,通过建立一个联合稀疏约束最优化模型求解 $\mathbf{a}_l$,其表达式为

$$(\hat{\mathbf{a}}_A, \hat{\mathbf{a}}_B) = \arg \min \left(\sum_l \|\mathbf{s}_l - \Phi \mathbf{a}_l\|_2^2 + \eta \|\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B\|_{2,1} \right) = \operatorname{argmin}[f(\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B)] \quad (8)$$

式中: η 为稀疏约束系数,其作用与 μ_l 相同;混合范数 $\|\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B\|_{2,1} = \sum_j (|\mathbf{a}_A)_j|^2 + |\mathbf{a}_B)_j|^2)^{1/2}$, $(\cdot)_j$ 表示第 j 列^[13]。InISAR 系统各通道所得的 ISAR 图像具有相同的稀疏分布,即多通道回波信号具有联合稀疏性,利用式(8)最优化模型重建图像时,混合范数 $\|\cdot\|_{2,1}$ 能够促进多通道回波信号集稀疏性的应用^[14],从而提高图像中强散射中心的重建精度。此外,与式(7)单通道稀疏约束的重建模型相比,利用联合稀疏约束最优化模型重建的超分辨图像具有相同的非零元素,即重建的强散射中心在不同图像中落于相同的位置,这有效地确保了多通道间相对相位信息的保持。因此,利用本文所提的超分辨成像算法,能够有效地利用多通道回波信号的相关性,从而提高了干涉相位信息的获取精度,得到更好成像质量的目标三维视图。

2.2 联合稀疏约束最优化求解算法

本文采用柯西-牛顿(Quasi-Newton)算法求解式(8)的优化问题,并结合快速傅里叶变换提高算法的运算效率。由于式(8)中的混合范数在零点处存在不可导问题,因此要对其进行近似计算,即 $\|\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B\|_{2,1} \approx \sum_j (|\mathbf{a}_A)_j|^2 + |\mathbf{a}_B)_j|^2 + \delta)^{1/2}$, 其中 δ 是一个小值非负常数。将此近似表达式代入式(8)后求得共轭梯度函数为

$$\nabla_{\mathbf{a}_l} f(\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B) = 2\Phi^H \Phi \mathbf{a}_l + \eta \Lambda(\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B) \mathbf{a}_l - 2\Phi^H \mathbf{s}_l = \mathbf{H}(\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B) \mathbf{a}_l - 2\Phi^H \mathbf{s}_l \quad (9)$$

其中 Hessian 矩阵近似为

$$\mathbf{H}(\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B) = 2\Phi^H \Phi + \eta \Lambda(\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B) \quad (10)$$

且有

$$\Lambda(\mathbf{a}_A, \mathbf{a}_B) = \operatorname{diag} \left[\frac{1}{(|\mathbf{a}_A)_j|^2 + |\mathbf{a}_B)_j|^2 + \delta} \right] \quad (11)$$

Hessian 矩阵是目标函数 $\mathbf{a}_l$ 本身的函数,可以通过迭代方法进行求解,迭代表达式为

$$\hat{\mathbf{a}}_l^{n+1} = [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{a}}_A^n, \hat{\mathbf{a}}_B^n)]^{-1} \Phi^H \mathbf{s}_l \quad (12)$$

式中: $\hat{\mathbf{a}}_l^{n+1}$ 表示第 $n+1$ 次迭代的结果; $[\cdot]^{-1}$ 表示矩阵求逆。直到估计值满足收敛条件 $\|\hat{\mathbf{a}}_l^{n+1} - \hat{\mathbf{a}}_l^n\|_2^2 / \|\hat{\mathbf{a}}_l^n\|_2^2 < \rho$ 时,迭代操作结束, ρ 表示预设门限。从迭代求解过程可知,算法的运算复杂度主要来源于 $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{a}}_A^n, \hat{\mathbf{a}}_B^n)$ 的求逆运算,假设其维度为 $K \times K$,则利用传统的 Cholesky 分解求逆的运算复杂度约为 $O(K^3/3)$ ^[15],因此,多次迭代求解时直接利用矩阵求逆的运算量是比较大的。为了避免矩阵求逆,可通过共轭梯度算法进行求解,且可通过利用 FFT 和 IFFT 简化式(9)中的矩阵乘法运算,有效提高该算法的运算效率。以 $\Phi^H \Phi \mathbf{a}_l$ 的计算为例,假设 $\mathbf{a}_l$ 表示 $K \times 1$ 的向量,运算 $\Phi^H \Phi \mathbf{a}_l$ 可通过对 $\mathbf{a}_l$ 首先进行 IFFT 操作,然后将对应空孔径部分的元素值设为零,最后作 FFT 完成。利用 FFT 以及 IFFT, $\Phi^H \Phi \mathbf{a}_l$ 的运算复杂度为 $O(K \ln K)$ 。综上所述,假设每次求解式(12)需要 N_c 次 Hessian 矩阵的迭代计算,则通过 FFT 简化后的运算量为 $O(N_c K \ln K)$,并假设整个求解过程需要迭代计算式(12) N_q 次,则本文所提算法的运算复杂度为 $O(N_q N_c K \ln K)$ 。相比之下,直接利用 Cholesky 分解矩阵求解的运算量为 $O(N_q K^3/3)$ 。由此可见,利用 FFT 以及 IFFT 使得本文算法的运算复杂度要小很多,确保了该算法的高效性。

利用式(8)重建得到各个通道的超分辨 ISAR 图像,然后通过式(5)求出目标的三维位置信息。本文所提出的 MCJSR-InISAR 三维成像流程图如图 2 所示。

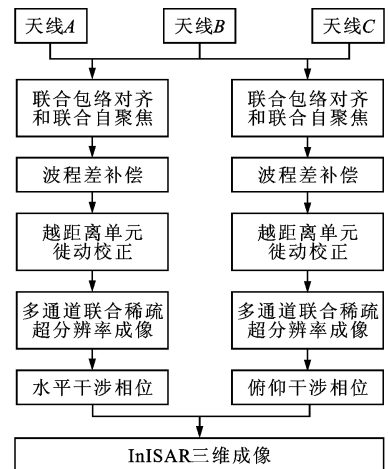


图 2 MCJSR-InISAR 三维成像算法流程图

3 实验结果

为验证本文所提算法的有效性,下面对雷达观

测一个飞机目标的实测数据进行处理,其光学图像如图 3 所示,相关的雷达系统参数如下:雷达与目标的距离约为 29 000 m,脉冲重复频率为 200 Hz,波长为 0.035 m。在短 CPI 内对目标进行观测,本文选取 64 个脉冲的回波数据进行处理,在实测数据处理中,方位向重建点数设为 256。在超分辨处理前,将回波信号幅度归一化为 200,并设置迭代门限 ρ 为 10^{-4} ,稀疏系数 η 为 0.015,常数 δ 为 10^{-6} 。



图 3 飞机光学图像

对目标进行长 CPI 观测(本实验选取 256 个脉冲),回波数据经联合包络对齐以及自聚焦处理后,得到的距离像如图 4 所示,可见越距离单元徙动现象比较明显,这增加了 ISAR 成像处理的复杂度。另外,选取某距离单元(如实验中选取第 136 个距离单元)信号,通过时频分析得到信号的时频分布,如图 5 所示的 Wigner-Ville 分布(WVD)。从图中可以看出,机动目标在长 CPI 观测下的多普勒谱是时变的,当利用传统的 RD 成像算法处理时,得到的 ISAR 图像会出现散焦现象。相比之下,当对目标进行短 CPI 观测时,平动补偿后得到的距离像如图 6 所示,可见越距离单元徙动现象可以忽略,并且短 CPI 条件下,机动目标的转动速度可以认为是恒定的,因此,短 CPI 观测更易于实现机动目标的成像和识别。然而,由于回波次数较少,利用传统的 RD 算法得到的 ISAR 图像方位分辨率较低,如图 7 所示,不利于目标的识别,因此需要采用超分辨成像算法提高分辨率。

按照图 2 所示的仿真流程,利用文献[10]中算法和本文算法对回波数据进行超分辨成像,为了分析成像算法的有效性,在此实验中提出采用图像熵作为评价成像质量的准则。以天线 B 为例,计算文献[10]中算法和本文算法重建得到的超分辨图像的熵值结果分别为 4.406 8 和 4.237 6。由此可见,本文算法有效地提高了图像中强散射中心的重建精度,能够获得更好成像质量的 ISAR 图像。另外,对

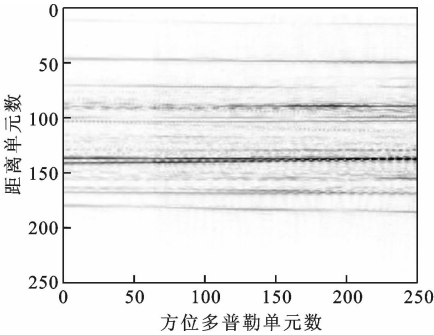


图 4 长 CPI 下平动补偿后的距离像

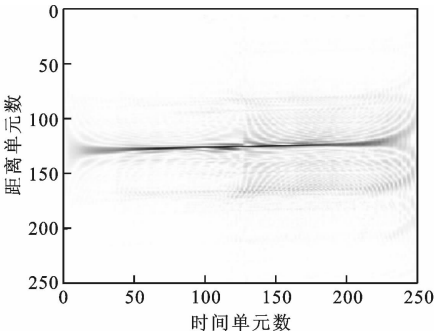


图 5 某距离单元信号的 WVD 图

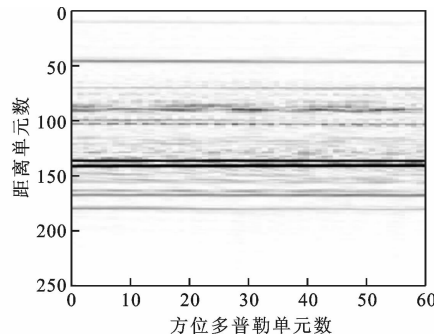


图 6 短 CPI 条件下平动补偿后的距离像

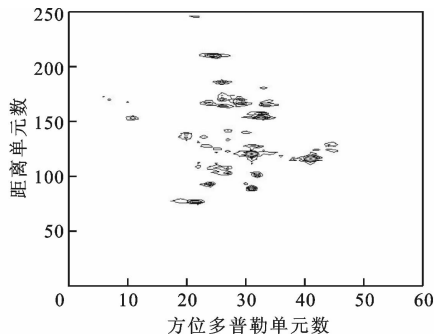


图 7 短 CPI 条件下的 RD 图像

超分辨图像处理后,得到的干涉相位分布比较图如图 8 所示。比较图 8a、c 与 b、d,从图中机头、机尾、机翼和机身部分也可以明显看出,与文献[10]算法相比,利用本文算法能获得精度更高的干涉相位。利用 2 种算法得到的目标三维图像比较图如图 9 所

示,从图 9 可见,利用本文算法能够得到更清晰的目标结构特征,与图 8 所示的干涉相位图相符合。由此验证,本文所提出的 MCJSR-InISAR 三维成像算法,具有更高的散射点重建精度,且能够有效地保持通道间的相对相位信息,从而获得更好成像质量的

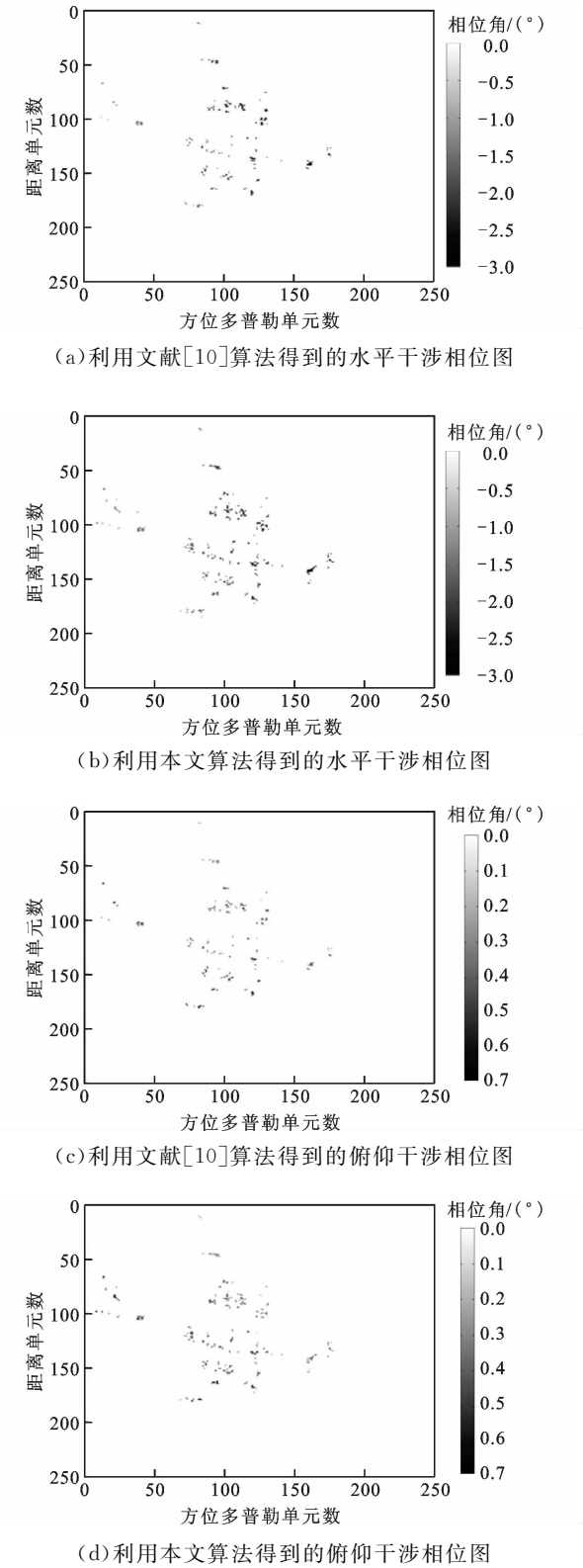


图 8 干涉相位图分布比较

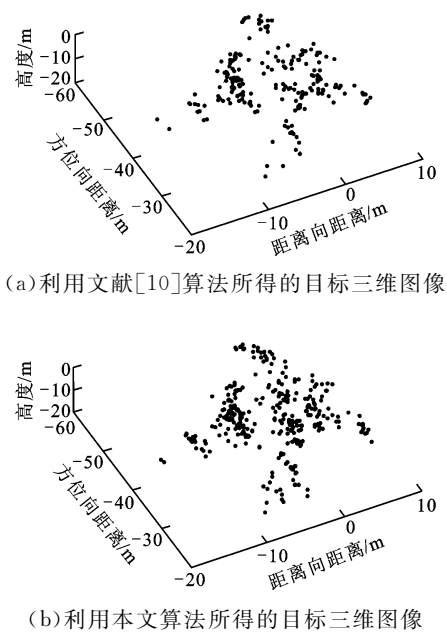


图 9 目标三维图像比较

目标三维图像,更有利于目标的识别。

最后,对实测数据处理的运算量进行分析。实验中需重建的超分辨图像大小为 256×256 像素,即每次迭代运算中 K 为 65 536, Hessian 矩阵的迭代运算次数 N_c 设为 200,利用本文所提算法达到设置的迭代收敛条件时,总共需要的迭代次数 N_q 为 136,根据 2.2 节的分析可知,本文算法的运算复杂度为 $O(136 \times 200 \times 65536 \times 1b65536)$,比直接利用 Cholesky 分解矩阵的求解运算量 $O(136 \times 65536^3/3)$ 小很多。由此证明,本文算法具有较高的运算效率。

4 结 论

本文针对短 CPI 内的 ISAR 机动目标,提出一种 MCJSR-InISAR 三维成像算法。基于 ISAR 图像的稀疏性,通过建立联合稀疏约束最优化信号模型重建超分辨 ISAR 图像,有效地利用了多通道回波信号间的相关性,提高了图像中散射点的重建精度,并确保通道间相对相位信息的保持,从而提高了干涉相位的估计精度,得到更精确的目标三维位置信息。此外,利用 FFT 简化了最优化问题的求解,提高了算法的运算效率。经实验验证,利用本文所提算法,能够得到更高质量的目标三维视图,有利于识别目标。

参考文献:

[1] WANG G, XIA X, CHEN V C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering target using three re-

- ceivers [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(3): 436-447.
- [2] XU X J, NARAYANAN R M. Three-dimensional interferometric ISAR imaging for target scattering diagnosis and modeling [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(7): 1094-1102.
- [3] LIU Y B, SONG M C, WU K, et al. High-quality 3-D InSAR imaging of maneuvering target based on a combined processing approach [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(5): 1036-1040.
- [4] ZHANG Q, TAT S Y, DU G, et al. Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(2): 292-300.
- [5] MOORE T G, ZUERNDORFER B W, BURT E C. Enhanced imagery using spectral-estimation-based techniques [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1997, 10(2): 171-186.
- [6] ZHANG L, XING M D, QIU C W, et al. Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(10): 3824-3838.
- [7] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [8] 陈倩倩, 徐刚, 李亚超, 等. 短孔径 ISAR 方位定标 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1854-1861.
CHEN Q Q, XU G, LI Y C, et al. Cross-range scaling for ISAR with short aperture data [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(8): 1854-1861.
- [9] 张磊. 高分辨 SAR/ISAR 成像及误差补偿技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [10] LIU Y B, LI N, WANG R, et al. Achieving high-quality three-dimensional InSAR imageries of maneuvering target via super-resolution ISAR imaging by exploiting sparseness [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(4): 828-832.
- [11] XING M D, WU R, LAN J, et al. Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(2): 141-144.
- [12] XU G, XING M D, ZHANG L, et al. Bayesian inverse synthetic aperture radar imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1150-1154.
- [13] HYDER M M, MAHATA K. A robust algorithm for joint-sparse recovery [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(12): 1091-1094.
- [14] RICHARD G, BARANIUK V C, MARCO F D, et al. Model-based compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(4): 1982-2001.
- [15] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2004.
- [本刊相关文献链接]**
- 孟自强, 李亚超, 李浩林, 等. 双/多基地合成孔径雷达前视三维分辨力研究及运动参数设计. 2014, 48(8): 29-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201408006]
- 杨桃丽, 索志勇, 李真芳, 等. 地球同步轨道合成孔径雷达干涉测量模型. 2014, 48(4): 85-89+101. [doi: 10.7652/xjtuxb201404015]
- 侯兴松, 张兰, 肖琳. 合成孔径雷达图像的贝叶斯压缩感知重构算法. 2013, 47(08): 74-79. [doi: 10.7652/xjtuxb201308013]
- 卢锦, 苏洪涛, 水鹏朗, 等. 辅助粒子滤波实现天波超视距雷达弱目标似然比检测. 2013, 47(8): 93-97. [doi: 10.7652/xjtuxb201308016]
- 朱磊, 水鹏朗, 章为川, 等. 利用区域划分的合成孔径雷达图像相干斑抑制算法. 2012, 46(10): 83-88. [doi: 10.7652/xjtuxb201210015]
- 李世忠, 王国宏, 白晶, 等. 压制干扰下雷达网目标概率多假设跟踪算法. 2012, 46(10): 101-106. [doi: 10.7652/xjtuxb201210018]
- 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 利用多输入多输出雷达低秩杂波的降维空时自适应算法. 2012, 46(8): 76-81. [doi: 10.7652/xjtuxb201208014]
- 朱军涛, 廖红建, 谢勇勇, 等. 采用短时傅里叶变换的铁路车载探地雷达数据解译方法. 2012, 46(7): 108-114. [doi: 10.7652/xjtuxb201207020]
- 张立峰, 王彤, 吴建新, 等. 机载雷达目标空时参数快速估计方法. 2012, 46(02): 135. [doi: 10.7652/xjtuxb201202023]
- 牛威, 苏威, 郝培杰, 等. 利用雷达散射截面序列的特定航天器工作平台分类识别方法. 2011, 45(12): 53-58. [doi: 10.7652/xjtuxb201112010]
- 陈士超, 武其松, 吴玉峰, 等. 一种大斜视双基地合成孔径雷达的频率变标成像算法. 2011, 45(10): 82-87. [doi: 10.7652/xjtuxb201110015]

(编辑 刘杨)