

基于最大对比度的联合相位误差校正方法

张超*, 张榆红, 张益鑫

(西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710600)

摘要:针对高分辨率逆合成孔径雷达(ISAR)成像过程中,因目标转动所引入的转动相位误差无法被忽略,以及由于转动相位误差使得传统平动相位误差校正方法性能严重下降的问题,提出了一种基于最大对比度的联合相位误差校正的方法,可同时校正残余的平动相位误差和转动相位误差,进一步提高成像的质量。首先利用传统的运动补偿方法对回波信号进行处理,其次根据最大对比度准则,将相位误差校正问题转化为最大对比度优化问题,最后利用改进的拟牛顿算法进行求解。该方法能使高分辨率ISAR进行精准成像,且所得图像聚焦效果良好。通过对仿真数据和实测数据的处理,验证了文中方法的有效性。

关键词:逆合成孔径雷达;最大对比度;拟牛顿算法;相位误差

中图分类号:TN957.52

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2024)04-0110-06

引用格式:张超,张榆红,张益鑫.基于最大对比度的联合相位误差校正方法[J].现代雷达,2024,46(4):110-115.

ZHANG Chao, ZHANG Yuhong, ZHANG Yixin. Joint phase error correction method based on maximum contrast[J].

Modern Radar, 2024, 46(4): 110-115.

Joint Phase Error Correction Method Based on Maximum Contrast

ZHANG Chao*, ZHANG Yuhong, ZHANG Yixin

(1. College of Electronic Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an Shaanxi 710600, China)

Abstract: In the process of high-resolution inverse synthetic aperture radar imaging (ISAR), the rotational phase error introduced by the target rotation cannot be ignored, and the performance of the traditional translational phase error correction method is seriously reduced due to the influence of the rotational phase error. Therefore, a method of joint phase error correction based on maximum contrast is proposed in this paper, which can correct the residual translational phase error and rotational phase error at the same time, and further improve the quality of imaging. Firstly, the echo signal is processed by the traditional motion compensation method, and then the phase error correction problem is converted into the maximum contrast optimization problem according to the maximum contrast criterion, and finally the improved Quasi-Newtonian algorithm is used to solve it. This method can enable accurate imaging of high-resolution inverse synthetic aperture radar, and the resulting image focusing effect is good. Through the processing of simulation data and real data, the effectiveness of the proposed method is verified.

key words: inverse synthetic aperture radar; maximum contrast; Quasi-Newtonian algorithm; phase error

0 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)是雷达成像技术的重要分支,由于ISAR能对非合作目标进行精确成像,因此在军事和民用领域都得到了广泛应用^[1]。在ISAR成像中,可将目标相对于雷达的运动分解为两个分量:一是目标姿态相对于雷达视线保持不变的平动分量;二是目标围绕自身某基准点转动的转动分量。其中,平动会引入包络偏移和相位误差而导致成像结果模糊,需要进行补偿,通过平动补偿后的运动目标可转换为转台目标,而目标转动时则会产生多样的多普勒频率,对成像有用^[2]。然而,在高分辨率ISAR成像中,目标转动会引起越距离单元徙动(MTRC),导致分辨率下降,影响成像结果,且分辨率越高,距离单元徙动越明显。因此,在高分辨率ISAR成像中,还需要进行转动补偿,消除目标转

动所引起的MTRC对成像的影响^[3]。

转动补偿也可以将MTRC分解为包络和相位两方面进行补偿。由于成像所需转角很小,包络的偏移一般不会超过一个距离分辨率单元,因此补偿包络偏移比较容易,常用的补偿方法有Keystone算法^[4]和极坐标格式算法(PFA)。当目标平稳运动时Keystone算法可以有效地实现对包络偏移的校正,在目标运动复杂或运动角度较大时,则常用PFA对其包络偏移进行校正。而目标转动对相位产生的影响是相对于雷达波长的,当雷达波长达到厘米级时,毫米级的径向走动也会引起明显的相位变化^[5]。因此,相位误差校正对于雷达成像也是至关重要的。针对相位误差校正问题现已提出了调频分解法、时频分析法^[6]、转动参数估计算法等多种方法。虽然这些算法均假设已成功实现转动补偿,但大都忽略了平动补偿后残留的平动相位误差。随着雷达分辨率的提高,因目标转动所产生的相

位误差会严重影响平动补偿的性能, 因此传统平动补偿后残留的相位误差也不能忽略^[7]。本文提出了一种基于最大对比度的联合相位误差校正的方法, 同时校正残余平动相位误差和转动相位误差, 进一步提高相位误差补偿的精度, 从而提高成像的质量。首先利用传统的平动补偿方法及 Keystone 算法对回波信号进行处理^[8], 其次根据最大对比度准则^[9]将相位误差校正问题转化为最大对比度优化问题, 最后利用改进的拟牛顿算法求出最大对比度, 得到最佳成像结果。

1 信号模型

ISAR 成像过程中, 需要依据在雷达视线范围内, 运动目标各散射点相对于雷达位置之间斜距的变化, 将接收到的散射点回波信号进行相位补偿, 对回波的相位补偿之后进行相加, 就能获得该散射点的能量积累^[10]。对雷达射线范围内所有散射点进行以上操作, 就能实现目标的二维成像。本文 ISAR 成像信号模型为匀速转动的二维 ISAR 成像模型, 如图 1 所示, 定义 O 点为目标的旋转中心, 雷达到目标旋转中心的视线为 Y 轴。目标有效转动矢量为 $\omega(t_m)$, 该矢量的指向定义为 Z 轴, 其中 t_m 是方位维慢时间, 目标绕 Z 轴转动会产生多样的多普勒频率, 是方位维成像的关键^[11]。 Z 轴可用右手螺旋法则来确定。通常, 在较短的相干积累时间中, 目标的有效转动矢量的大小和方向都是不变的^[12]。因此, 有效转动速度可表示为 $|\omega(t_m)| = \omega$, 则在 t_m 时刻目标的转动角度为 $\theta(t_m) = \omega t_m$ 。位于目标上的一个散射点 $P(x_p, y_p)$, 其与雷达之间的距离 $R_p(t_m)$ 可表示为

$$R_p(t_m) = R_o(t_m) + r_p(t_m) = R_o + \Delta R_o(t_m) + y_p \cos(\theta(t_m)) - x_p \sin(\theta(t_m)) \quad (1)$$

式中: R_o 表示为雷达到运动目标中心的初始距离; $\Delta R_o(t_m)$ 表示雷达与目标之间因平动产生的距离变化; $R_o(t_m)$ 为 t_m 时刻雷达与目标之间的瞬时距离, 且相对各散射点的变化都相同; $r_p(t_m)$ 表示雷达与目标之间由于目标转动所引起的距离变化, 对不同散射点其产生的变化也不同。

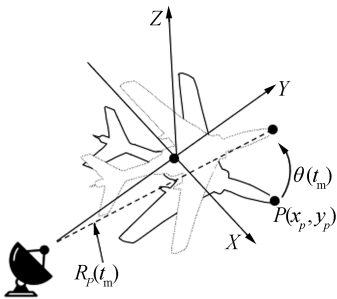


图 1 ISAR 成像几何模型

Fig. 1 The ISAR imaging geometric model

雷达发射线性调频信号, 其接收到的回波信号可以表示为

$$s_p(t_r; t_m) = A_p \text{rect} \left(B \left(t_r - 2 \frac{R_p(t_m)}{c} \right) \right) \cdot \exp \left(j\pi \gamma \left(t_r - \frac{2R_p(t_m)}{c} \right)^2 \right) \cdot \exp \left(-j4\pi \frac{R_p(t_m)}{\lambda} \right) \quad (2)$$

式中: A_p 为散射点 P 的散射系数; B, λ 分别表示信号的带宽和波长; t_r 为快时间; c 为光速; γ 为调频率。

对回波信号进行脉冲压缩, 经过脉冲压缩处理可消除第一相位项的影响, 脉冲压缩后的回波信号可表示为

$$s_p(t_r; t_m) = A_p \text{sinc} \left(B \left(t_r - 2 \frac{R_p(t_m)}{c} \right) \right) \cdot \exp \left(-j4\pi \frac{R_p(t_m)}{\lambda} \right) \quad (3)$$

对式(1)中 $r_p(t_m)$ 进行泰勒级数展开, 其泰勒展开式可表示为

$$r_p(t_m) \approx y_p \left(1 - \frac{\theta^2(t_m)}{2} \right) - x_p \theta(t_m) \approx y_p - x_p \omega t_m - \frac{y_p \omega^2}{2} t_m^2 \quad (4)$$

其中, $\cos(\theta(t_m)) \approx 1 - \theta^2(t_m)/2$, $\sin(\theta(t_m)) \approx \theta(t_m)$ 。由于目标匀速转动且观测时间短, 因此在泰勒展开式仅保留到了二次项。将式(1)和式(4)代入式(3), 得

$$s_p(t_r; t_m) \approx A_p \text{sinc} \left(B \left(t_r - \frac{2R_o(t_m) + 2y_p - 2x_p \omega t_m - y_p \omega^2 t_m^2}{c} \right) \right) \cdot \exp \left(-j2\pi \frac{2R_o(t_m) + 2y_p - 2x_p \omega t_m - y_p \omega^2 t_m^2}{\lambda} \right) \quad (5)$$

式中: $\text{sinc}(\cdot)$ 表示回波的包络项; $\exp(\cdot)$ 表示回波的相位项, 在高分辨率成像过程中, 转动会产生无法忽略的二次相位误差。

对经脉冲压缩后的回波信号进行粗补偿。首先进行平动补偿, 消除因平动所产生的包络偏移, 并消减平动相位误差, 避免因平动相位误差过大而影响转动相位误差的估计^[13]。平动补偿后, 可得

$$s_p(t_r; t_m) \approx A_p \text{sinc} \left(B \left(t_r - \frac{2R_0 + 2y_p - 2x_p \omega t_m - y_p \omega^2 t_m^2}{c} \right) \right) \times \exp \left(-j2\pi \frac{2R'_0(t_m) + 2y_p - 2x_p \omega t_m - y_p \omega^2 t_m^2}{\lambda} \right) \quad (6)$$

假设 $R'_0(t_m)$ 表示经平动补偿后残留的平动瞬时距离偏差。分辨率较低时,传统的相位误差校正方法可以实现精准的误差校正;随着分辨率的提高,转动所引入的二次相位误差对传统的相位误差校正方法提出了挑战,且导致因平动所产生的相位误差不能被完全补偿,对 ISAR 雷达成像效果有明显的影响^[14]。

然后,对平动补偿后的信号进行 Keystone 变换,消除因转动所引起的包络偏移。Keystone 变换后,可得

$$s_p(t_r; t_m) \approx A_p \text{sinc} \left(B \left(t_r - 2 \frac{R_0 + y_p}{c} \right) \right) \exp \left(-j2\pi \frac{2R'_0(t_m) + 2y_p - 2x_p \omega t_m - y_p \omega^2 t_m^2}{\lambda} \right) \quad (7)$$

2 基于最大对比度的联合相位误差校正方法

由于目标转动所产生的相位误差的影响,导致传统的相位误差校正方法的性能严重下降,已不能精准地实现相位误差校正。为解决上述问题,提高补偿精度,提出了一种基于最大对比度的联合相位误差校正的方法,将相位误差校正问题转化为最大对比度优化问题,可同时校正残余的平动相位误差和转动相位误差,以得到更好的成像效果。将式(7)离散化后可得

$$s(n, m) = \sum_{h=0}^{M-1} \left\{ g(n, h) \exp \left(j2\pi \frac{hm}{M} \right) \cdot \exp(j\phi_m) \exp \left(jy_p \alpha \left(m - \frac{M}{2} \right)^2 \right) \right\} \quad (8)$$

式中: M 表示总的脉冲数; $g(n, h)$ 表示图像的第 (n, h) 个像素; $\phi_m = -4\pi R'_0(t_m)/\lambda$ 表示第 m 个脉冲残余的平动相位误差;最后一项是因转动产生的相位误差,其中 $\alpha = 2\pi f_c \omega^2 / (cf_r^2)$, f_c 表示发射信号载频, f_r 表示脉冲重复频率。

假设回波信号已完成相位误差校正,则经过相位误差校正后的 ISAR 雷达图像可表示为

$$g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha}) = \sum_{m=1}^M \left\{ s(n, m) \exp \left(-j2\pi \frac{hm}{M} \right) \cdot \exp(-j\hat{\phi}_m) \exp \left(-jy_p \hat{\alpha} \left(m - \frac{M}{2} \right)^2 \right) \right\} \quad (9)$$

式中: $\hat{\phi}$ 表示残余的平动相位误差校正因子, $\hat{\phi} = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_m, \dots, \hat{\phi}_M]$; $\hat{\alpha}$ 表示转动相位误差校正因子。

ISAR 图像的对比度可表示为

$$C = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{h=0}^{M-1} \frac{\sigma \left[|g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha})|^2 \right]}{E \left[|g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha})|^2 \right]} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{h=0}^{M-1} \frac{\sqrt{E \left\{ \left[|g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha})|^2 - E \left(|g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha})|^2 \right) \right]^2 \right\}}}{E \left[|g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha})|^2 \right]} \quad (10)$$

式中: N 表示距离单元个数; $\sigma(\cdot)$ 表示图像强度标准差; $E(\cdot)$ 表示图像强度均值; $E \left[|g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha})|^2 \right]$ 表示信号能量。由帕塞瓦尔定理可知,信号的能量是不变的,因此 $E \left[|g(n, h; \hat{\phi}, \hat{\alpha})|^2 \right]$ 是不随相位误差变化的常数。求解式(10)可同时实现对相位误差校正因子 $\hat{\phi}$ 和 $\hat{\alpha}$ 的估计。

ISAR 雷达成像过程中,由于相位误差的影响,导致图像对比度降低,ISAR 图像散焦。相反,聚焦良好的图像往往在一些像素上显示出尖峰,图像对比度较大。因此,我们可以用图像对比度大小来判断相位误差校正的精度,通过使对比度最大化来获取参数最优解。可将相位误差估计函数表示为

$$(\hat{\phi}, \hat{\alpha}) = \arg \max_{\hat{\phi}, \hat{\alpha}} C(\hat{\phi}, \hat{\alpha}) \quad (11)$$

为求解式(11)中多个未知参数的最大对比度优化问题,本文使用了改进的拟牛顿算法,可实现对两个参数同时求解,且能有效地保障算法的高效性和收敛性。求解时,仅估计 $\hat{\phi}$ 和 $\hat{\alpha}$ 中的某一个参数,保持其他参数不变,依次类推迭代估计 $\hat{\phi}$ 和 $\hat{\alpha}$ 中的每一个参数。具体步骤如下。

(1) 首先,估计平动补偿后残余的平动相位误差和转动相位误差。残余的平动相位误差 $\hat{\phi}$ 和转动相位误差 $\hat{\alpha}$ 的第 i 次迭代的估计值分别用 $\hat{\phi}^{(i)}$ 和 $\hat{\alpha}^{(i)}$ 来表示, $\hat{\phi}^{(i, m)}$ 表示 $\hat{\phi}$ 在第 i 次迭代中前 m 个参数已完成更新,即

$$\hat{\phi}^{(i, m)} = \left[\hat{\phi}_1^{(i)} \hat{\phi}_2^{(i)} \cdots \hat{\phi}_m^{(i)} \hat{\phi}_{m+1}^{(i-1)} \cdots \hat{\phi}_M^{(i-1)} \right] \quad (12)$$

式中: $\hat{\phi}_m^{(i)}$ 表示参数 $\hat{\phi}_m$ 在第 i 次迭代的结果, $\hat{\phi}_m^{(i)} = \hat{\phi}_m^{(i-1)} + \Delta \hat{\phi}_m^{(i)}$, $\Delta \hat{\phi}_m^{(i)}$ 是第 i 次迭代中 $\hat{\phi}_m^{(i)}$ 的更新变量;

同理也可用 $\Delta\hat{\alpha}$ 来表示 $\hat{\alpha}$ 的更新变量, $\hat{\alpha}^{(i)} = \hat{\alpha}^{(i-1)} + \Delta\hat{\alpha}^{(i)}$ 。将 $\hat{\phi}$ 中所有参数和参数 $\hat{\alpha}$ 估计完成就表示进行了一次迭代。

$$\begin{cases} \Delta\hat{\phi}_m^{(i)} = \arg \max_{\Delta\hat{\phi}_m} C(\hat{\phi}^{(i,m)}, \hat{\alpha}^{(i-1)}) \\ \Delta\hat{\alpha}^{(i)} = \arg \max_{\Delta\hat{\alpha}} C(\hat{\phi}^{(i,M)}, \hat{\alpha}^{(i-1)} + \Delta\hat{\alpha}^{(i)}) \end{cases} \quad (13)$$

(2) 其次, 采用改进的拟牛顿算法对式(13)进行求解。

$$\begin{cases} \Delta\hat{\phi}_m^{(i)} = - \left(\nabla^2 C(\hat{\phi}^{(i,m)}, \hat{\alpha}^{(i-1)}) \right)^{-1} \cdot \nabla C(\hat{\phi}^{(i,m)}, \hat{\alpha}^{(i-1)}) \Big|_{\Delta\hat{\phi}_m^{(i)}} = 0 \\ \Delta\hat{\alpha}^{(i)} = - \left(\nabla^2 C(\hat{\phi}^{(i,M)}, \hat{\alpha}^{(i-1)} + \Delta\hat{\alpha}^{(i)}) \right)^{-1} \cdot \nabla C(\hat{\phi}^{(i,M)}, \hat{\alpha}^{(i-1)} + \Delta\hat{\alpha}^{(i)}) \Big|_{\Delta\hat{\alpha}^{(i)}} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\nabla^2 C(\hat{\phi}^{(i,m)}, \hat{\alpha}^{(i-1)})$ 和 $\nabla C(\hat{\phi}^{(i,m)}, \hat{\alpha}^{(i-1)})$ 分别表示矩阵 $C(\hat{\phi}^{(i,m)}, \hat{\alpha}^{(i-1)})$ 的 Hessian 矩阵和相对于变量 $\Delta\hat{\phi}_m^{(i)}$ 的梯度; 同理 $\nabla^2 C(\hat{\phi}^{(i,M)}, \hat{\alpha}^{(i-1)} + \Delta\hat{\alpha}^{(i)})$ 和 $\nabla C(\hat{\phi}^{(i,M)}, \hat{\alpha}^{(i-1)} + \Delta\hat{\alpha}^{(i)})$ 分别表示矩阵 $C(\hat{\phi}^{(i,M)}, \hat{\alpha}^{(i-1)} + \Delta\hat{\alpha}^{(i)})$ 的 Hessian 矩阵和相对于变量 $\Delta\hat{\alpha}^{(i)}$ 的梯度。

(3) 最后, 设置迭代的终止条件, 迭代终止条件可设置为

$$\left| C(\hat{\phi}^{(i,M)}, \hat{\alpha}^{(i)}) - C(\hat{\phi}^{(i-1,M)}, \hat{\alpha}^{(i-1)}) \right| \leq \rho \quad (15)$$

式中: ρ 是极小且大于零的常数门限值, 当满足式(15)或达到预先设置的迭代次数时, 迭代循环终止, 便可得到 $\hat{\phi}$ 和 $\hat{\alpha}$ 的最终估计值。此时, 得到的 ISAR 雷达图像对比度最大, 成像效果最佳。

需要注意的是, 虽然上一节为提高求解的收敛性已经对相位误差进行了粗补偿, 但本节利用拟牛顿法对求解残余相位仍具有较高的运算量。本节的运算量主要是对残余相位的 Hessian 矩阵和变量梯度进行运算。假设改进拟牛顿算法的迭代次数是 n , $\hat{\phi}$ 有 m 个参数, 那么本节求解残余相位需要对 Hessian 矩阵和变量梯度进行 $2n \times m$ 次运算。

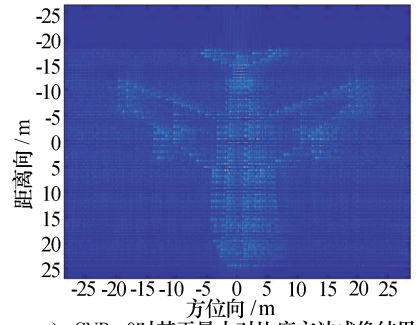
3 数据处理及结果分析

该节通过对仿真数据与实测数据的处理, 对算法的有效性进行验证。验证过程中将基于最大对比度相

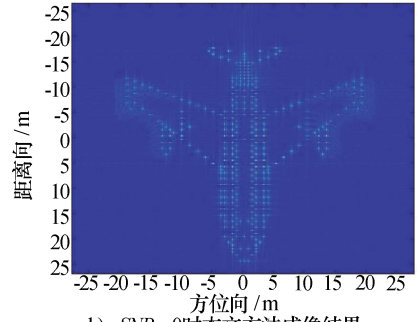
位误差校正方法与本文方法进行对比, 在相同条件下分别对两种方法进行处理, 将运算结果进行对比分析。

仿真实验中, 采用的飞机模型由 330 个散射点组成, 其尺寸为 $42 \text{ m} \times 38.26 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 。设置雷达发射信号带宽为 600 MHz, 载频为 9.6 GHz, 脉冲重复率为 100 Hz, 目标匀速转动转速为 0.028 rad/s。在回波信号添加随机相位误差和高斯噪声, 并在信噪比为 0 dB 和 10 dB 时, 分别对两种方法进行对比验证。设迭代门限 $\rho = 10^{-5}$, 最大迭代次数为 400 次。

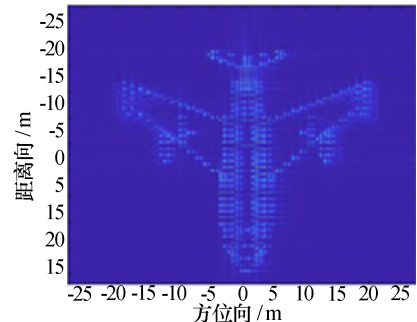
如图 2 所示, 在信噪比为 0 dB 和 10 dB 时, 分别用两种方法进行了成像。从图中可以看出, 在信噪比为 0 dB 时, 基于最大对比度的方法以无法精准聚焦成像, 而本文方法仍然能够较为精准地成像; 信噪比为 10 dB 时, 两种方法都能得到良好的成像结果, 而明显本文方法所得图像的聚焦效果更好。由此, 验证了本文算法的有效性。



a) SNR=0时基于最大对比度方法成像结果
a) When SNR=0, the imaging results based on the maximum contrast method



b) SNR=0时本文方法成像结果
b) When SNR=0 the imaging results of this method



c) SNR=10时基于最大对比度方法成像结果
c) When SNR=10 the imaging results based on the maximum contrast method

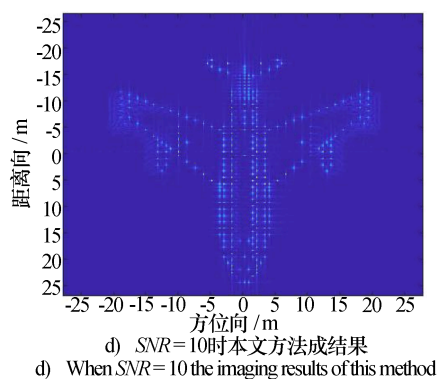


图2 不同信噪比时两种方法成像结果
Fig.2 Imaging results of two methods at different signal to noise ratios

下面对雅克-42的实测数据进行处理,以进一步验证本文方法的有效性,设置雷达发射信号带宽为400 MHz,载频为7.8 GHz,脉冲重复率为100 Hz。其他参数设置与仿真数据实验参数相同。

实测数据分别经过两种方法处理后,得到图3所示的成像结果。从图中标注的圆圈可以看出经本文方法处理后的数据,所得图像聚焦效果更好。由此,进一步验证了本文方法的有效性。

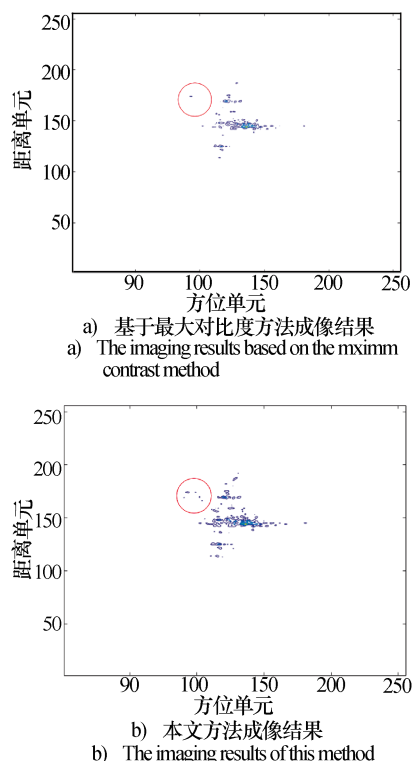


图3 实测数据成像结果
Fig.3 Imaging results of actual measured data

4 结束语

本文基于最大对比度准则,提出了一种基于最大对比度的联合相位误差校正的方法。本方法可同时校

正残余的平动相位误差和转动相位误差,并根据最大对比度准则,将相位误差校正问题转换为最大对比度优化问题,采用改进的拟牛顿算法求解最大对比度。通过对仿真数据和实测数据的处理,有效地验证了本文所提方法的有效性。该方法能使高分辨率ISAR进行精准成像,且所得图像聚焦效果良好。

参考文献 (References)

- [1] 保铮, 孙长印, 邢孟道. 机动目标的逆合成孔径雷达成像原理与算法[J]. 电子学报, 2000(6): 24-28.
BAO Zheng, SUN Changyin, XING Mengdao. Principle and algorithm of inverse synthetic aperture radar imaging for maneuvering targets [J]. Acta Electronica Sinica, 2000 (6): 24-28.
- [2] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technique [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [3] ZHU D Y, WANG L, YU Y S, et al. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profiles [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204-208.
- [4] XING M D, WU R B, LAN J Q, et al. Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(2): 141-144.
- [5] 张鹏, 彭希亮, 陆经营. 毫米波高分辨成像相控阵雷达试验研究[J]. 现代雷达, 2021, 43(7): 27-31.
ZHANG Peng, PENG Xiliang, LU Jingying. Experimental research on millimeter wave phased array radar for high resolution imaging [J]. Modern Radar, 2021, 43(7): 27-31.
- [6] CHEN V C, MICELI W J. Time-varying spectral analysis for radar imaging of maneuvering targets [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 1998, 145: 262-268.
- [7] 张榆红, 邢孟道. 联合的平动和转动相位自聚焦方法[J]. 西安: 西安电子科技大学学报, 2016, 43(5): 31-35.
ZHANG Yuhong, XING Mengdao. Approach to joint translational and rotational phase auto-focusing [J]. Xi'an: Journal of Xidian University, 2016, 43(5): 31-35.
- [8] YE W, YEO T S, BAO Z. Weighted Least-Squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2487-2494.
- [9] 邵帅, 张磊, 刘宏伟. 一种基于图像最大对比度的