

# 非均匀转动目标 ISAR 成像及横向定标

贺思三, 龙戈农, 赵会宁, 冯存前

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 当目标在平面内非均匀转动时, 传统算法不能获得包含定标信息且聚焦良好的 ISAR 像。为解决这一问题, 提出了一种非均匀转动目标的转动参数估计方法。该方法首先通过一维搜索对角加速度与角速度的比值进行估计, 并根据估计结果对原始距离像序列进行非均匀采样, 补偿角加速度引起的相位误差, 从而得到聚焦的 ISAR 像; 然后根据成像质量准则对重采样距离像序列的角速度进行一维搜索, 估计出角速度, 进而实现 ISAR 像的横向定标。仿真结果表明: 该算法通过 2 个一维搜索能得到非均匀转动目标聚焦的、横向定标的 ISAR 像。

**关键词** ISAR; 非均匀转动; 横向定标; 图像对比度

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.008

**中图分类号** TN957.52 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0036-05

逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 可以获得目标二维高分辨像。它通过发射宽带信号得到纵向高分辨, 通过目标相对雷达转动引起的 Doppler 效应获得横向高分辨<sup>[1]</sup>。传统的 ISAR 成像算法是基于目标均匀转动前提下的, 而实际上目标存在机动, 其运动不一定满足均匀转动模型。目标的非均匀转动会在 ISAR 信号中引入 2 次及高次相位, 使得散射点的多普勒频谱展宽, 所得 ISAR 像变得模糊。

针对非均匀转角 ISAR 成像问题, 一般的处理方法是利用时-频变换代替横向傅里叶变换<sup>[2]</sup>, 得到目标的瞬时像。该类方法不需要对转动参数进行估计, 但应用时-频分析技术时要对交叉项抑制及分辨率问题进行深入分析。近年来, 很多学者从运动参数估计出发, 对非均匀转动目标 ISAR 成像进行研究。文献[3]将转动等效为匀加速转动模型, 消除非均匀转动引起的相位误差, 得到聚焦的 ISAR 像。文献[4]利用 3 次多项式相位信号来描述非均匀转动目标回波, 基于 Clean 思想对多散射中心参数进行估计。文献[5]则对接收信号进行分段处理, 在每一段利用匀速转动模型对角速度进行估计。文献[6-7]则根据图像质量准则, 在转动速度、转动加速度二维平面上对最优成像质量进行搜索, 当图像质量最好时, 对应参数即为估计出的转动速度与转动加速度参数。上述算法均只考虑了由于非均匀转动引起的高次相位项, 忽略了匀速转动引起的二阶相位项, 它们均只能得到聚焦的 ISAR 像, 而不能对所得 ISAR 像进行横向定标。

本文基于匀加速转模型, 通过 2 个一维搜索对转动参数进行估计。

## 1 目标回波信号模型

假设目标在成像时间内转动角度不大, 并认为已对平动进行补偿, 在纵向距离压缩后所得距离像序列的第  $n$  个距离单元上有  $K_n$  个散射中心, 其信号为<sup>[3]</sup>:

$$s(n, t) = \sum_{k=1}^{K_n} \delta_{nk} \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c}{c} [x_{nk} \sin(\theta(t)) + y_{nk} \cos(\theta(t))] \right] \quad (1)$$

式中:  $t$  表示慢时间;  $f_c$  表示雷达中心频率;  $c$  为光速;  $\delta_{nk}$  表示散射中心的散射系数;  $(x_{nk}, y_{nk})$  表示散射中心

\* 收稿日期: 2011-11-07

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8007)

作者简介: 贺思三(1981-), 男, 湖南湘潭人, 讲师, 博士, 主要从事自动目标识别、非平稳信号分析研究。

E-mail: hesisan@163.com

相对于其旋转中心的坐标,其中  $x_{nk}$  表示横向坐标,  $y_n$  表示雷达视线方向的纵向坐标,可以从距离像上获得。

假设目标满足匀加速转动模型,其角度变化可表示为:

$$\theta(t) = \omega_0 t + \dot{\omega}_0 t^2 / 2 \quad (2)$$

式中:  $T_r$  为脉冲重复周期;  $\omega_0$  与  $\dot{\omega}_0$  分别为转动角速度及其加速度。将式(2)代入式(1),并对  $\sin(\theta(t))$  与  $\cos(\theta(t))$  进行二阶泰勒展开,有:

$$s(n, t) = \sum_{k=1}^{K_n} \delta_{nk} \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[ x_{nk} (\omega_0 t + \dot{\omega}_0 t^2 / 2) + y_n - \frac{1}{2} y_n (\omega_0 t + \dot{\omega}_0 t^2 / 2)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

上式表明,各距离单元回波信号可等效为多个高次相位项的和,而高次相位参数与转动角速度、角加速度及其散射中心位置有关。

## 2 非均匀转动参数估计

### 2.1 角加速度 / 角速度比值估计

设转动角加速度与转动角速度的比值为  $\beta_0 = \dot{\omega}_0 / \omega_0$ , 式(3)可表示为:

$$s(n, t) = \sum_{k=1}^{K_n} \delta_{nk} \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[ x_{nk} \omega_0 \left( t + \beta_0 \frac{t^2}{2} \right) + y_n - \frac{1}{2} y_n \omega_0^2 \left( t + \beta_0 \frac{t^2}{2} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

若采用新的参考时间:

$$t' = t + \beta t^2 / 2 \quad (5)$$

对  $s(n, t)$  进行非均匀采样,采样后的信号可表示为:

$$s_1(n, t'; \beta) = \sum_{k=1}^{K_n} \delta_{nk} \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[ x_{nk} \omega_0 \left( t' + \frac{1}{2} (\beta_0 - \beta) t'^2 \right) + y_n - \frac{1}{2} y_n \omega_0^2 \left( t' + \frac{1}{2} (\beta_0 - \beta) t'^2 \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

当恰好有  $\beta = \beta_0$  时,  $s_1(n, t'; \beta)$  等效为匀速转动模型,完全补偿了由角加速度引起的2次相位,只包含了由于目标转动引起的2次相位项(一般的成像系统中,成像时间内转过的角度为几度,有  $\omega_0^2 (MT_r)^2 \ll 1$ ),此时成像质量最好。因此,可对  $\beta$  进行一维搜索,根据图像质量最优准则对  $\beta_0$  进行估计。常用的图像质量评价准则有图像熵<sup>[8]</sup> 准则与图像对比度<sup>[9]</sup> 准则,在本文中,利用图像对比度对成像质量进行评价,其定义为:

$$I_C(\text{Imag}) = \sqrt{E[ (|\text{Imag}|^2 - E(|\text{Imag}|^2))^2 ]} / E(|\text{Imag}|^2) \quad (7)$$

式中:  $\text{Imag}$  表示所得距离像或二维像;  $E(\cdot)$  表示求均值。图像对比度越大,表示图像聚焦越好、质量越高。文献[9]利用图像对比度准则对平动引起的相位误差进行补偿,达到较好的效果。

对  $\beta$  进行一维搜索,根据图像对比度最大准则得到  $\beta_0$  估计结果:

$$\hat{\beta}_0 = \arg \max_{\beta} \{ I_C(\text{Ft}[w; s_1(n, t'; \beta)]) \} \quad (8)$$

式中  $\text{Ft}[w; s_1(n, t'; \beta)]$  为对  $s_1(n, t'; \beta)$  关于  $t'$  进行傅里叶变换后的结果,即横向压缩后的 ISAR 像。

在估计出  $\hat{\beta}_0$  后,采用新的参考时间  $t' = t + \hat{\beta}_0 t^2 / 2$  得  $s_1(n, t'; \hat{\beta}_0)$ ,  $s_1(n, t'; \hat{\beta}_0)$  可近似为匀速转动模型,对其进行横向压缩能得到聚焦的 ISAR 像,但其横向单元对应分辨率未知。为了实现横向定标,需要进一步对  $s_1(n, t'; \hat{\beta}_0)$  的转动角速度进行估计。

### 2.2 转动角速度估计

假设已经对  $\beta_0$  进行了正确估计,并按式(5)对式  $s_1(n, t)$  进行重新采样,可得:

$$s_2(n, t') = \sum_{k=1}^{K_n} \delta_{nk} \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[ x_{nk} \omega_0 t' + y_n - y_n \omega_0^2 t'^2 / 2 \right] \right\} \quad (9)$$

上式中的2次相位项将会造成成像结果的模糊,降低图像质量。式(9)中,第  $n$  个距离单元对应的  $y_n$  已知,假设目标旋转速度为  $\omega$ ,可以对  $s_2(n, t')$  进行相位补偿:

$$s_3(n, t'; \omega) = s_2(n, t') \exp(-j 2\pi f_c y_n \omega^2 t'^2 / c) \quad (10)$$

当恰好有  $\omega = \omega_0$  时,  $s_3(n, t')$  2次相位项恰好被完全抵消,对其进行横向压缩后所成像质量最高。因此,可对转动角速度  $\omega$  进行一维搜索,根据图像对比度最大准则对  $\omega_0$  进行估计:

$$\hat{\omega}_0 = \arg \max_{\omega} \{I_c(\text{Ft}[w; s_1(n, t'; \beta)])\} \quad (11)$$

在得到转动参数估计后对  $s_3(n, t'; \hat{\omega}_0)$  横向压缩即可得到聚焦的、横向定标的 ISAR 像,其横向分辨率为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta r_x = \lambda/2\Delta\theta = c/2f_c \hat{\omega}_0 T \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  为雷达波长,有  $\lambda = c/f_c$ ;  $\Delta\theta$  为成像其间转过的角度,有  $\Delta\theta = \hat{\omega}_0 T$ ,  $T$  为  $s_3(n, t'; \hat{\omega}_0)$  总的时间长度。

### 2.3 非均匀转角参数估计流程

基于上述分析,可得转动参数估计流程为:①设定  $\beta$  的搜索范围并对其量化,设定  $\omega$  的搜索范围并对其量化;②针对  $s(n, t)$ ,按照式(8)得到  $\hat{\omega}_0/\omega_0$  的初始估计值  $\hat{\beta}_0$ ;③根据  $\hat{\beta}_0$  对  $s(n, t)$  进行重采样,得  $s_2(n, t') = s_1(n, t'; \hat{\beta}_0)$ ;④针对  $s_2(n, t')$ ,根据式(11)得到  $\hat{\omega}_0$  的估计值  $\hat{\omega}_0$ ,结合式(3)所得  $\hat{\beta}_0$ ,可知角加速度估计值  $\hat{\omega}_0 = \hat{\beta}_0 \omega_0$ ;⑤基于  $\hat{\omega}_0$  计算,对  $s_3(n, t') = s_1(n, t'; \hat{\omega}_0)$  进行横向压缩得到 ISAR 像,并基于  $\hat{\omega}_0$  对其进行横向定标。

需要指出的是,在  $\hat{\beta}_0$  与  $\hat{\omega}_0$  的估计过程中,所利用信息均为回波的高次相位信息,通过对高次相位信息的补偿,根据成像质量对其参数进行估计。在估计  $\hat{\beta}_0$  时主要是利用非均匀转动造成的 2 次及高次项,而在估计  $\hat{\omega}_0$  时所利用的是匀速转动与横向距离耦合对应 2 次项。 $\hat{\beta}_0$  的估计误差所导致的 2 次相位补偿残差将影响  $\hat{\omega}_0$  的估计精度,仿真实验也验证了这一点,但进一步分析表明,  $\hat{\beta}_0$  估计误差对  $\hat{\omega}_0$  估计性能影响不大,其估计结果仍可满足应用需求。

## 3 仿真及实测数据处理

### 3.1 算法估计性能分析

下面利用蒙特卡罗方法对算法性能进行分析,参数设置如下:雷达频率范围为 9-9.5 GHz,重频为 100 Hz,观测时间为 1 s。为验证算法对各类目标的适用性,每次蒙特卡罗试验中的目标均随机产生,产生方法如下:目标包含 40 个幅度为 1 的散射中心,它们的纵向位置在  $[-8, 8]$  范围内均匀随机分布,横向位置在  $[-6, 6]$  范围内均匀随机分布。

首先单独分析  $\hat{\beta}_0 = \hat{\omega}_0/\omega_0$  的估计性能。设置目标转动角速度  $\omega_0 = 3^\circ/\text{s}$ 。为了验证算法对各种  $\beta_0$  值的适用性,每一次试验时  $\beta_0$  在  $[-0.5, 1]$  的范围内随机产生。进行 500 次蒙特卡罗仿真,得  $\hat{\beta}_0$  的均方根误差见图 1,从图 1 可以看出,当信噪比大于 -6 dB 时,估计性能趋于稳定,估计方差为 0.05 左右。图 2 为不同信噪比条件下  $\hat{\beta}_0$  估计误差的概率密度图,从图 2 可以看出,当  $\text{SNR} > -6$  dB 时,大部分的误差落在  $[-0.05, 0.05]$  区间内。

下面分析  $\hat{\beta}_0$  估计误差对  $\hat{\omega}_0$  估计性能的影响。设置目标转动角速度为  $3^\circ/\text{s}$ ,测试目标随机产生,当  $\hat{\beta}_0$  估计不存在误差时(仿真时设置,不进行重采样,直接利用式(11)对  $\hat{\omega}_0$  进行估计)得  $\hat{\omega}_0$  估计性能见图 3 中圆点实线所示;当认为  $\hat{\beta}_0$  的估计方差为 0.05 的高斯分布的随机变量时得  $\hat{\omega}_0$  估计性能见图 3 中星号线所示。从图 3 可以看出,在信噪比大于 0 dB 时,2 种情况下的估计性能稳定;在  $\hat{\beta}_0$  存在估计误差时,其对应的 2 次相位补偿残差将影响  $\hat{\omega}_0$  估计结果,估计性能下降 3 dB 左右。

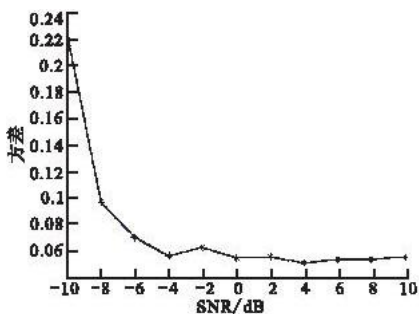


图 1  $\hat{\beta}_0$  估计性能曲线

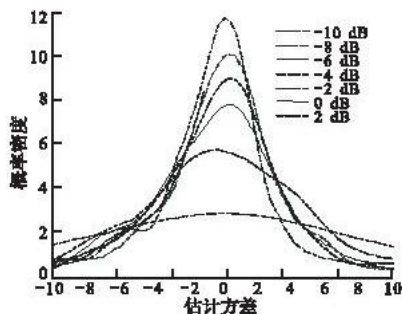


图 2  $\hat{\beta}_0$  估计误差概率密度

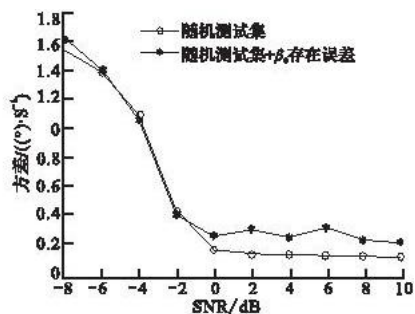


图 3  $\hat{\omega}_0$  估计性能曲线

Fig. 1 Estimation performance of  $\hat{\beta}_0$

Fig. 2 Probabilistic density of the estimation error of  $\hat{\beta}_0$

Fig. 3 Estimation performance of  $\hat{\omega}_0$

下面对  $\dot{\omega}_0$  与  $\omega_0$  的联合估计性能进行分析。设置目标转动角速度为  $3^\circ/\text{s}$ , 转动加速度在  $[-1.5, 3]^\circ/\text{s}^2$  范围内随机均匀分布, 测试目标随机产生, 所得转动角速度与转动角加速度估计误差见图 4。从图可以看出, 当信噪比大于  $0\text{ dB}$  时,  $\dot{\omega}_0$  估计误差不大于  $0.2^\circ/\text{s}^2$ ;  $\omega_0$  估计方差不大于  $0.3^\circ/\text{s}$ , 也就是不大于转动角速度的  $10\%$ , 对应的横向定标误差也将小于  $10\%$ 。

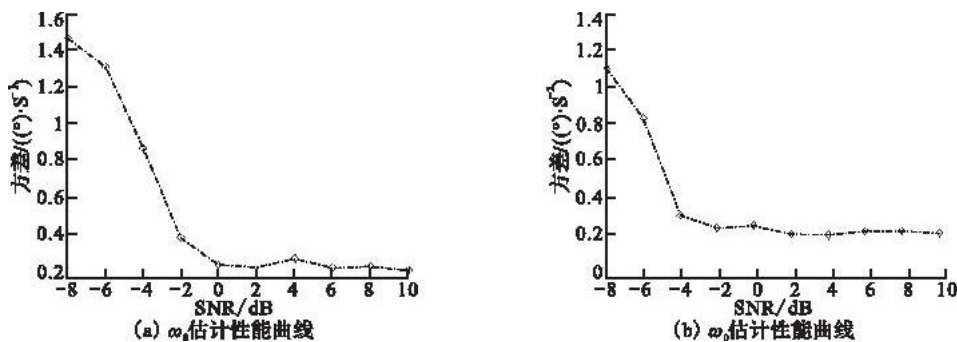


图4 联合估计性能曲线

Fig. 4 Estimation performance for associated estimation algorithm

### 3.2 实测数据处理

所用观测雷达为频率步进雷达, 雷达频率范围为  $34 - 34.512\text{ GHz}$ , 频率步进间隔为  $2\text{ MHz}$ , 一帧距离像对应  $256$  个频点, 对应距离分辨率为  $0.293\text{ m}$ ; 脉冲重复频率为  $50\text{ kHz}$ , 对应帧重复频率为  $195.3\text{ Hz}$ 。目标为放置在转台上的  $4$  面体角反射器阵列, 它的底面是一个边长为  $2.5\text{ m}$  的等边三角形, 顶点到底面距离  $1.5\text{ m}$ , 在其  $4$  个顶点各有一个角反射器, 结构见图 5。在试验时, 调整转台转速使其转动角速度发生忽快忽慢的变化, 对其中一段数据进行  $2$  维成像所得结果见图 6, 在图 6 中可以看到  $4$  个角反射器对应的  $4$  个点, 由于目标转动非匀速, 成像结果产生了明显的模糊。首先对  $\beta_0$  进行估计, 所得估计结果为  $\beta_0 = -0.15$ , 将其带入式(9)对信号进行重行采样后所得 ISAR 像见图 7。从图 7 可以看出, 重采样后所得 ISAR 像各点得到了很好的聚焦。按照 2.2 节方法对转动角速度估计结果为  $9.8^\circ/\text{s}$ 。由于在数据测量时并没有转动速度测量仪器, 因此并不知道目标转动角速度的实际变化情况, 为验证算法有效性, 下面对定标后所估计出的目标尺寸与目标实际尺寸进行比较。根据估计出的转动角速度可得到横向定标结果见图 7, 其中 1、2、3 3 个点两两之间的距离分别为  $[2.38\text{ m}, 2.34\text{ m}, 2.23\text{ m}]$ , 相对与三角架实际底面边长  $2.5\text{ m}$  误差小于  $10\%$ 。



图5 角反射器阵列

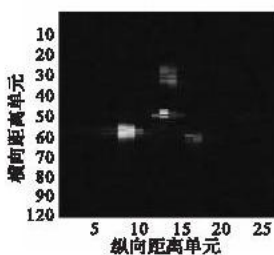


图6 原始 ISAR 像

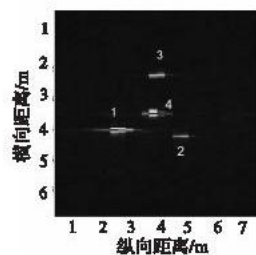


图7 重采样后 ISAR 像及定标结果

Fig. 5 Structure of corner reflector array

Fig. 6 ISAR image of the raw data

Fig. 7 ISAR image of the resampled data

## 4 结束语

基于匀加速转动模型, 本文给出了一种分步的非均匀转动参数估计算法, 它只需通过  $2$  个一维搜索就能实现角速度与角加速度的有效估计, 得到聚焦的、横向定标的 ISAR 像。仿真及实测数据验证了本文方法的有效性。

本文所基于的信号模型是二维平面的匀加速度转动模型, 如何对三维平面的转动数据进行相位补偿, 实现目标的二维、甚至三维成像是进一步的研究方向。

## 参考文献(References):

- [1] 陈秀伟, 张云华, 张祥坤. 弹道导弹的 ISAR 回波模拟[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(4):29-34.  
CHEN Xiuwei, ZHANG Yunhua, ZHANG Xiangkun. Ballistic missile echo simulation based on ISAR[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition, 2011, 12(4):29-34. (in Chinese)
- [2] Du L, Su G. Adaptive inverse synthetic aperture radar imaging for nonuniformly moving targets [J]. IEEE geoscience and remote sensing letters, 2005, 2(3):247-249.
- [3] 韩兴斌, 胡卫东, 郁文贤, 等. 一种非均匀转动目标的 ISAR 自聚焦算法[J]. 信号处理, 2007, 23(6):844-848.  
HAN Xingbin, HU Weidong, YU Wenxian, et al. An ISAR autofocus algorithm for the yarget with nonuniform rotation[J]. Signal processing, 2007, 23(6):844-848. (in Chinese)
- [4] LI Y, Wu Y, Xing M, et al. Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion[J]. IET radar sonar navig, 2008, 2(6):395-403.
- [5] Berger E, Hamran T S, Sparr T. Estimation of rotation in ISAR imaging based on local sharpness measure[C]// IEEE radar conf. [S. l.]:IEEE press, 2008:1674-1679.
- [6] Francesco Prodi. ISAR cross-range scaling using a correlation based functional[C]// IEEE radar conf. [S. l.]:IEEE press, 2008:1951-1956.
- [7] Debora Pastina. Rotation motion estimation for high resolution ISAR and hybrid SAR/ISAR target imaging[C]// IEEE radar conf. [S. l.]:IEEE press, 2008:1933-1938.
- [8] Li Xi, Liu Guosui, Jinlin Ni. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization[J]. IEEE transaction on aerospace and electronic systems, 1999, 35(4):1240-1252.
- [9] Martorella M, Berizzi F, Haywood B. A contrast maximization based technique for 2D ISAR autofocusing[J]. IEE proceedings radar sonar and navigation, 2005, 152(4):253-262.
- [10] 何劲, 杨小优, 张群, 等. 逆合成孔径成像激光雷达系统设计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(4):26-30.  
HE Jin, YANG Xiaoyou, ZHANG Qun, et al. The system design of inverse synthetic aperture imaging LADAR[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition, 2010, 11(4):26-30. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## ISAR Imaging and Cross Scaling for Non-uniform Rotating Targets

HE Si-san, LONG Ge-nong, ZHAO Hui-ning, FENG Cun-qian

(School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** The use of traditional algorithms cannot obtain a well-focused and cross scaled ISAR image for non-uniform rotating targets. To solve this problem, a method is proposed to estimate the rotating parameters when targets undergo non-uniform rotation. Firstly, the ratio between the angular acceleration and the angular velocity is estimated by one dimension search. By non-uniformly sampling the raw profile sequence according to the estimated ratio, the phase error caused by angular acceleration can be compensated and a focused ISAR image can be obtained. Based on the rule of image quality, the rotating velocity of the resample signal can be estimated by another one dimension search. Furthermore, the scalar of cross-range can be obtained. A focused, cross-range scaled ISAR imaging can be obtained for non-uniform rotating targets based the proposed algorithm. Experimentations with the simulated and measured ISAR data demonstrate the effectiveness of the algorithm.

**Key words:** ISAR; non-uniform rotation; cross scaling; image contrast.