

基于调频傅里叶变换的匀加速转动目标 ISAR 成像

付耀文, 胡杰民, 黎 湘

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 现有匀加速旋转目标逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像方法通常采用二维搜索估计目标转动参数, 从而导致计算量大。提出一种基于调频傅里叶变换的 ISAR 成像方法。该方法利用目标散射点回波相位二次项系数与一次项系数的比值仅取决于目标转动参数这一特点, 通过搜索调频傅里叶变换的调频系数使目标横向像熵值最小, 得到该比值的估计结果, 避免了二维搜索导致的计算量大的问题。然后对各距离单元回波作相应的调频傅里叶变换, 即可得到聚焦良好的 ISAR 像。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 调频傅里叶变换; 匀加速转动

中图分类号: TN 95

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.08

ISAR imaging of uniformly accelerative rotating targets based on chirp-Fourier transform

FU Yao-wen, HU Jie-min, LI Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The existing inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging methods for uniformly accelerative rotating targets usually estimate the rotation parameters via 2-D search, which leads to a huge computational load. A novel ISAR imaging method based on chirp-Fourier transform is proposed, which utilizes the characteristic of uniformly accelerative rotating target's echo phase that the ratio of the coefficient of the second order term of scattering point's echo phase to that of the first order term is only determined by target's rotation parameters. The estimate of the ratio can be obtained by searching the frequency modulation coefficient of chirp-Fourier transform that minimizes the entropy of target's cross-range profile, which is a 1-D search. Then the well-focused ISAR image can be obtained by taking corresponding chirp-Fourier transform on each range cell's echo. Simulation results verify the validity of this method.

Keywords: inverse synthetic aperture radar; chirp-Fourier transform; uniformly accelerative rotation

0 引言

逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)的基本原理是通过发射宽带信号实现径向高分辨, 利用目标相对雷达转动产生的多普勒实现横向高分辨, 从而获得目标二维高分辨图像, 目标的 ISAR 像反映了目标散射点在雷达成像平面的投影, 是雷达目标识别的重要手段之一, 近年来受到各国的广泛研究。

在目标可近似为匀速转动且目标散射点不发生越距离单元移动的条件下, 直接采用距离多普勒算法就可以得到较好的目标 ISAR 像。但是当目标机动或存在翻滚、进动等微动时, 平动补偿后, 其相对雷达的运动通常为非匀速旋转运动。目标非均匀转动会在 ISAR 信号中引入新的相位

误差, 并且该相位误差与散射点位置有关, 不能用统一的相位误差函数进行校正。文献[1]提出通过改变雷达波束的重复发射频率使得对非均匀旋转的目标进行不等时间间隔采样, 从而使目标在两次相邻回波间相对雷达视线所转过的角度相同; 文献[2]将整个孔径分成若干个小的子孔径, 认为目标在每个子孔径上可近似为均匀转动, 分别对每个子孔径利用傅里叶变换成像, 然后对所得的像进行相干累加得到整个孔径的像; 文献[3-5]分别利用联合时频分析法、Chirplet 法和自适应短时傅里叶变换方法对目标成距离-瞬时多普勒像。针对匀加速转动目标, 文献[6]利用目标特点信息估计转动参数, 然后对回波进行补偿后成像, 其缺点在于实际情况中难以找到高质量的孤立散射点; 文献[7]提出变斜率广义边缘积分的 ISAR 成像方法, 在时

收稿日期: 2011-03-07; 修回日期: 2011-05-20。

基金项目: 国家杰出青年基金(61025006)资助课题

作者简介: 付耀文(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为信息融合与雷达成像。E-mail: fuyao wen@sina.com

频面上按各斜线的实际倾斜情况沿斜线积分实现横向聚焦;文献[8]将离散匹配傅里叶变换引入到 ISAR 成像中,采用二维搜索和 clean 的思想逐个分离距离单元内的散射点,计算量很大,且当目标存在大量散射点而又不存在特显点时,很难进行分离;文献[9]提出直接将匹配傅里叶变换用于横向压缩,但对目标回波信号的调频参数搜索方法没有进行改进。

本文推导了距离压缩后慢时间域目标散射点回波相位与转动参数之间的解析关系。利用目标散射点回波相位二次项系数与一次项系数比值仅与目标转动参数有关这一特点,提出一种基于调频傅里叶变换的 ISAR 成像方法。该方法首先通过搜索调频傅里叶变换的调频系数使目标横向像熵值最小得到散射点回波相位二次项系数与一次项系数比值的估计结果,避免了二维搜索导致的计算量大的问题。然后根据估计出的散射点回波相位二次项系数与一次项系数比值,对各距离单元目标回波作相应的调频傅里叶变换即可得到聚焦良好的 ISAR 像。仿真结果验证了算法的有效性。

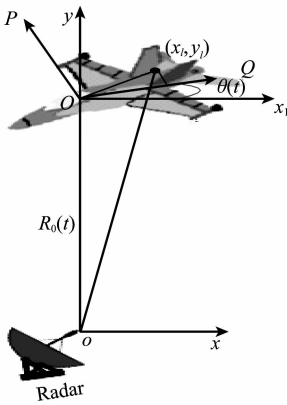


图 1 雷达与目标几何示意图

1 目标回波建模

雷达与目标的几何示意图如图 1 所示,雷达坐标系为 xoy ,假定目标转动平面在 xoy 内,目标本体坐标系为 POQ ,参考坐标系 x_1Oy 为雷达坐标系平移得到,坐标原点与目标本体坐标系原点重合。设初始时刻目标本体坐标系 POQ 与参考坐标系 x_1Oy 重合,目标坐标系原点与雷达的距离为 R_0 ,目标匀加速转动,初始旋转角速度为 ω ,转动加速度为 α ,则 t 时刻目标旋转过的角度为 $\theta(t) = \omega t + \frac{1}{2}\alpha t^2$ 。目标上散射点 l 在目标坐标系中的坐标为 (x_l, y_l) ,在远场条件下 t 时刻该点与雷达相位中心的距离为

$$R_l(t) = R_0(t) + x_l \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\alpha t^2\right) + y_l \cos\left(\omega t + \frac{1}{2}\alpha t^2\right) \quad (1)$$

雷达发射线形调频信号为

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma t^2\right)\right\} \quad (2)$$

式中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$ 为发射信号的矩形包络; f_c 为载频; $\gamma = \frac{B}{T_p}$ 为调频斜率, B 为带宽, T_p 为脉冲宽度; $\hat{t} = t - mT$ 为快时间; $t_m = mT$ 为慢时间, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 为发射脉冲的序号, T 为脉冲重复周期。

忽略脉冲内目标的运动,目标回波可表示为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_{l=1}^L \delta_k \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \tau_l(t_m)}{T_p}\right] \exp\left\{j2\pi \cdot \left[f_c(t - \tau_l(t_m)) + \frac{1}{2}\gamma(\hat{t} - \tau_l(t_m))^2\right]\right\} \quad (3)$$

式中, L 为目标散射点个数; $\tau_l(t_m) = \frac{2R_l(t_m)}{c}$ 为第 l 个散射点回波的时延。设参考信号的基准距离为 $R_{\text{ref}}(t_m)$ 与 $R_0(t_m)$ 完全匹配(若不一致,可通过平动补偿达到同样效果),对回波做解频调处理并补偿掉视频残余项和包络斜置项,可得距离压缩后的距离慢时间域信号为

$$S(r, t_m) = \sum_{l=1}^L \delta_l T_p \text{sinc}\left\{\frac{2\gamma T_p}{c}\left[r - x_l \sin\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right) - y_l \cos\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right)\right]\right\} \times \exp\left\{-j\frac{4\pi f_c}{c}\left[x_l \sin\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right) + y_l \cos\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right)\right]\right\} \quad (4)$$

通常成像时间内目标旋转过的角度较小,可以进行如下近似:

$$\sin\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right) \approx \omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2 \quad (5)$$

$$\cos\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right) \approx 1 \quad (6)$$

则式(4)可以近似表示为

$$S(r, t_m) = \sum_{l=1}^L \delta_l T_p \text{sinc}\left\{\frac{2\gamma T_p}{c}\left[r - x_l\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right) - y_l\right]\right\} \times \exp\left\{-j\frac{4\pi f_c}{c}\left[x_l\left(\omega t_m + \frac{1}{2}\alpha t_m^2\right) + y_l\right]\right\} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,距离压缩后的目标慢时间域回波包含多个二项式相位信号分量,且二次项系数与一次项系数的比值 $\gamma_0 = \frac{\alpha}{2\omega}$,只与目标转动参数有关。由于相位二次项的存在,直接利用傅里叶变换对横向进行聚焦会导致图像模糊。

2 基于调频傅里叶变换的 ISAR 成像方法

对于匀加速旋转目标的成像问题,目标转动参数的估

计是重点也是难点。文献[7]中先对目标回波作匹配傅里叶变换,然后二维搜索散射点信息并通过 clean 分离的方法估计转动参数,计算量大。考虑到目标慢时间域回波相位二次项系数与一次项系数的比值 γ_0 只与目标转动参数有关这一特点,可采用调频傅里叶变换估计 γ_0 ,然后对目标慢时间域回波进行基于该比值的调频傅里叶变换即可实现横向聚焦,得到清晰的目标 ISAR 像。

2.1 调频傅里叶变换

调频傅里叶变换可以理解成匹配傅里叶变换的极坐标表示方式,连续信号 $s(t)$ 的调频傅里叶变换为

$$F(f, \gamma) = \int s(t) \exp [j2\pi ft(1 + \gamma t)] dt \quad (8)$$

若 $s(t)$ 为二项式相位信号,表达式为

$$s(t) = \exp [-j2\pi f_1 t(1 + \gamma_1 t)] \quad (9)$$

式中, f_1, γ_1 为信号参数。将式(9)代入式(8)可得二项式相位信号 $s(t)$ 的调频傅里叶变换为

$$F(f, \gamma) = \int \exp \{j2\pi [(f - f_1)t + (f\gamma - f_1\gamma_1)t^2]\} dt \quad (10)$$

当 $f = f_1, \gamma = \gamma_1$ 时,积分信号相参累加,达到极大值;反之,积分时信号存在互相抵消的现象,参数域上对应点的幅值很小。因此,二项式相位信号调频傅里叶变换的结果在参数域上表现为在对应位置 (f_1, γ_1) 处出现尖峰。

实际计算机实现时需采用离散形式的调频傅里叶变换。离散信号 $s(n)$ 的调频傅里叶变换为

$$F(k, \gamma) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp [j2\pi knT(1 + \gamma nT)] (nT) \quad (11)$$

式中, T 为采样周期; N 为序列长度。

2.2 成像方法

由于目标散射点可能存在越距离单元走动,同一散射点的回波可能分散到邻近的几个距离单元,因此直接选取某一距离单元的数据来估计 γ_0 并不合理。本文基于目标所有散射点回波对 γ_0 进行估计,将式(7)关于距离向积分可得

$$S_0(t_m) = \int S(r, t_m) dr = \sum_{i=1}^L \delta_i T_p \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left[x_i \left(\omega t_m + \frac{1}{2} \alpha t_m^2 \right) + y_i \right] \right\} \times \int \text{sinc} \left\{ \frac{2\gamma T_p}{c} \left[r - x_i \left(\omega t_m + \frac{1}{2} \alpha t_m^2 \right) - y_i \right] \right\} dr \quad (12)$$

由于 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数是冲击函数的近似,因此处于不同位置的 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数在距离向的积分可认为近似相同,即

$$A \approx \int \text{sinc} \left\{ \frac{2\gamma T_p}{c} \left[r - x_i \left(\omega t_m + \frac{1}{2} \alpha t_m^2 \right) - y_i \right] \right\} dr \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得

$$S_0(t_m) = \sum_{i=1}^L A \delta_i T_p \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \cdot \left[x_i \left(\omega t_m + \frac{1}{2} \alpha t_m^2 \right) + y_i \right] \right\} \quad (14)$$

对 $S_0(t_m)$ 进行调频傅里叶变换可得

$$F_0(f, \gamma) = \int S_0(t_m) \exp [j2\pi f t_m(1 + \gamma t_m)] dt_m = \sum_{i=1}^L A \delta_i T_p \exp \left(-j \frac{4\pi f_c y_i}{c} \right) \int \exp \left\{ j2\pi \left[\left(f - \frac{2f_c x_i \omega}{c} \right) t_m + \left(f\gamma - \frac{f_c x_i \alpha}{c} \right) t_m^2 \right] \right\} dt_m \quad (15)$$

由式(15)可知,当 $f = \frac{2f_c x_i \omega}{c}$ 且 $\gamma = \frac{\alpha}{2\omega}$ 时,对应第 l 个散射点的信号相干积累,参数域相应位置出现尖峰,且目标上所有散射点对应尖峰的 γ 均为 $\frac{\alpha}{2\omega}$ 。因此,当 $\gamma = \frac{\alpha}{2\omega}$ 时,回波相位中的二次项被完全补偿, $S_0(t_m)$ 的一次项分量能够聚焦,当 $\gamma \neq \frac{\alpha}{2\omega}$ 时,回波相位中的二次项不能被完全补偿,变换后结果出现散焦。因此,对参数域中的 γ 进行搜索,当 $F_0(f, \gamma)$ 的熵值最小时所对应的 γ 作为 γ_0 的估计值。对固定的 γ ,离散序列 $F_0(k, \gamma)$ 的熵定义为

$$H(\gamma) = - \sum_{k=0}^{M-1} |F_0(k, \gamma)| \ln [|F_0(k, \gamma)|] \quad (16)$$

利用已估计出的比值 γ_0 ,对每个距离单元的信号进行调频傅里叶变换即可得到目标的 ISAR 像。

3 误差分析

3.1 目标近似为匀加速转动的条件

实际情况下目标很难满足理想的匀加速转动条件,因此需要在雷达观测时间内目标可近似为匀加速转动的条件。

假设目标转动规律为

$$\theta(t) = \omega t + \frac{1}{2} \alpha t^2 + \frac{1}{6} \dot{\alpha} t^3 + \dots \quad (17)$$

式中, $\dot{\alpha}$ 为转动加加速度。目标可近似为匀加速转动的条件为:距离压缩后的慢时间域回波信号相位三次项在成像积累时间内变化小于 2π ,即

$$\frac{4\pi f_c D}{c} \frac{1}{6} \dot{\alpha} M^3 T^3 < 2\pi, \quad \dot{\alpha} < \frac{3c}{f_c D M^3 T^3} \quad (18)$$

式中, D 为目标横向长度; M 为成像积累脉冲数。

3.2 γ_0 估计精度要求

当回波相位二次项系数与一次项系数的比值 γ_0 估计不准确时,对应的调频傅里叶变换不能完全补偿距离压缩后的慢时间域目标回波相位二次项。因此,需要分

析 γ_0 的估计精度要求。假定 γ_0 估计误差为 $\Delta\gamma$, 当 $\Delta\gamma$ 导致的回波最大相位误差小于 2π 时, 可以忽略其对成像的影响, 即

$$\frac{4\pi f_c D\omega\Delta\gamma M^2 T^2}{c} < 2\pi, \Delta\gamma < \frac{c}{2f_c D\omega M^2 T^2} \quad (19)$$

在满足不等式(19)的情况下, 可不考虑 γ_0 估计误差对成像的影响。

4 仿真实验及结果分析

假设雷达工作在 X 波段, 其中心频率为 10 GHz, 发射线性调频信号, 带宽为 500 MHz, 由此获得 0.3 m 的距离分辨率; 脉冲重复频率为 1 kHz, 相干脉冲数为 128, 因此 ISAR 成像的积累时间为 0.128 s; 脉冲内的采样点数为 128。目标模型如图 2 所示, 目标包含 140 个散射点, 且散射强度均相同, 目标旋转角速度为 $\omega=0.2$ rad/s, 旋转加速度为 $\alpha=2$ rad/s², 相位系数比值 $\gamma_0 = \frac{\alpha}{2\omega} = 5$ 。

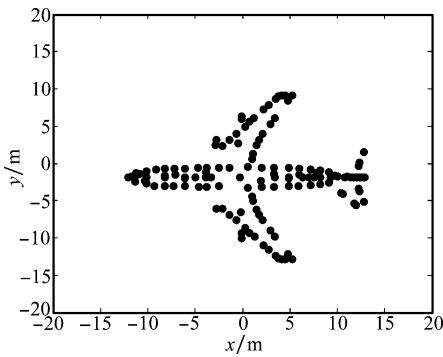


图 2 目标散射点模型

直接利用 RD 算法对目标进行成像, 对图像幅度归一化后以对数标度显示, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 直接进行 RD 成像会使图像发生散焦现象, 且散射点距离旋转中心的方向向距离越远, 散焦越严重, 利用图像对比度对成像效果进行衡量^[10], 得到 RD 成像结果的对比度为 8.612 3。利用本文方法对目标回波信号的调频斜率估计结果如图 4 所示, 可以看出当相位系数比值 γ 在真实值附近时熵值最小。根据估计出的相位系数比值 γ_0 , 对方向向采用调频傅里叶变换的成像结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 可以看出本文方法能够有效校正匀加速转动目标的方向向散焦现象, 计算可知本文方法成像结果的对比度为 11.815, 较 RD 成像的质量有了较大的提高。

为了比较算法的性能, 在此也对时频方法的成像结果进行了仿真, 本文采用 SP 谱图变换的成像结果如图 6 所示, 图像对比度为 9.737 8。由于时频方法存在交叉项且计算量较大, 不利于工程应用, 相比较而言, 本文方法的成像结果更清晰, 且计算量相对较小, 因此为匀加速运动目标的实时成像提供了一种新的思路。

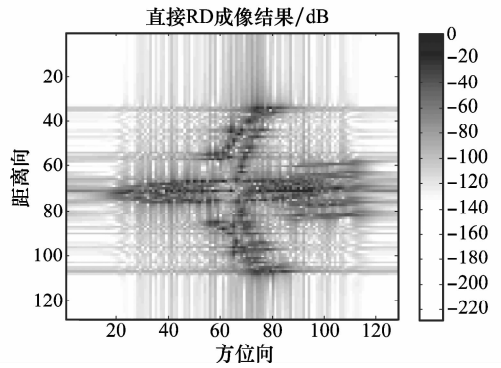


图 3 目标直接 RD 成像结果

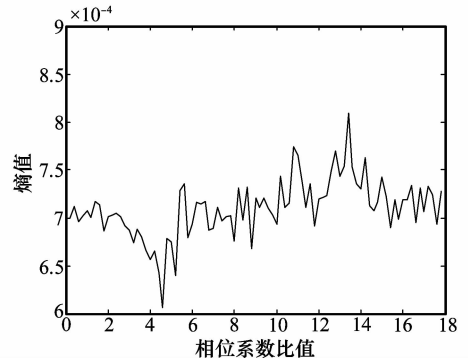


图 4 相位系数比值估计结果

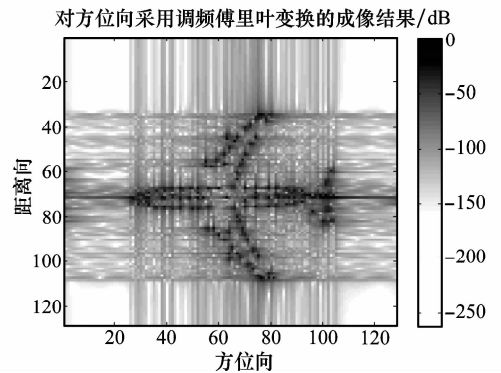


图 5 基于调频傅里叶变换的成像结果

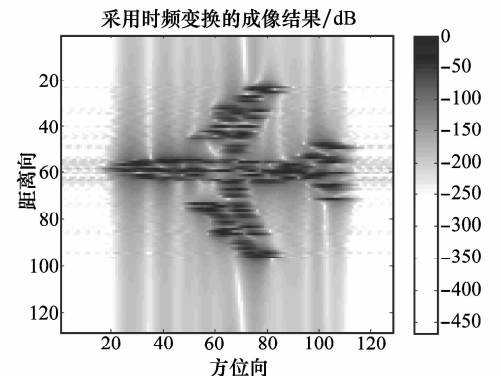


图 6 SP 谱图的成像结果

5 结 论

目标匀加速转动会使散射点回波相位增加二次项,因此直接采用傅里叶变换成像时会造成方位向的散焦,本文针对匀加速转动目标的散射点回波二次相位系数与一次项系数的比值为定值这一特点,提出一种基于调频傅里叶变换的 ISAR 成像方法。该方法利用目标上所有散射点回波,通过调频傅里叶变换后寻找最小熵的方法估计回波二次相位系数与一次项系数的比值,避免了距离单元选取对估计的影响,且不需要分离散射点,有效减少了计算量。仿真数据验证了算法的有效性。需要指出的是,目标匀加速转动还可能造成散射点的越径向距离单元走动,且目标还存在更高次的转动形式,这还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging[J]. *IEEE Trans. on Aerospace Electronic System*, 1980, 16(1): 2 - 14.
- [2] Jain A, Patel I SAR/ISAR imaging of a non-uniformly rotating target[J]. *IEEE Trans. on Aerospace Electronic System*, 1992, 28(1): 317 - 320.
- [3] Chen V C, Qian S. Joint time-frequency analysis for radar range-Doppler imaging[J]. *IEEE Trans. on Aerospace Electronic System*, 1998, 34(2): 486 - 499.
- [4] Bao Z, Wang G Y. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets based on chirplet decomposition[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(9): 1534 - 1541.
- [5] Lu G Y, Bao Z. A new method for ISAR range-instantaneous-Doppler imaging[C]// *Proc. of the Fourth International Conference on Signal Processing*, 1998, 1481 - 1484.
- [6] Muñoz-Ferreras J M, Pérez-Martínez F. Non-uniform rotation rate estimation for ISAR in case of slant range migration induced by angular motion[J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2007, 1(4): 251 - 260.
- [7] Wang G Y, Bao Z, Sun X B. Inverse synthetic aperture radar imaging of non-uniformly rotating targets[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(10): 3007 - 3011.
- [8] 刘爱芳, 朱晓华, 陆锦辉, 等. 基于离散匹配傅里叶变换的逆合成孔径雷达成像算法[J]. *兵工学报*, 2004, 25(4): 458 - 461. (Liu A F, Zhu X H, Lu J H, et al. Imaging in inverse synthetic aperture radar based on discrete matching Fourier transform[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(4): 458 - 461.)
- [9] 黄雅静, 曹敏, 付耀文, 等. 基于匹配傅里叶变换的匀加速旋转目标成像[J]. *信号处理*, 2009, 25(6): 864 - 867. (Huang Y J, Cao M, Fu Y W, et al. ISAR imaging of equably accelerative rotating targets based on matching Fourier transform[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(6): 864 - 867.)
- [10] Berizzi F, Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(3): 1185 - 1191.