

## 基于图像对比度最优的频率步进 ISAR 成像方法\*

陈杰,肖怀铁,范红旗,宋志勇

(国防科技大学 自动目标识别重点实验室,湖南长沙 410073)

**摘要:**在频率步进高分辨 ISAR 成像中,目标的径向运动会带来距离多普勒耦合,从而对 ISAR 图像有较大的影响。提出了一种基于图像对比度最优的运动参数估计方法。该法分析了径向速度和径向加速度对多普勒像对比度函数的影响。通过构造相位补偿因子,在多普勒像中基于多普勒像对比度最优估计径向加速度。在径向加速度补偿后,在距离像中基于距离像对比度最优估计径向速度。进行运动补偿,利用 RD 算法实现了目标的高分辨 ISAR 成像。该方法具有运动参数估计精度高和计算量小的优点。仿真结果验证了方法的有效性。

**关键词:**逆合成孔径雷达成像;频率步进信号;运动补偿;对比度最优;参数估计

**中图分类号:** TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)01-093-05

## ISAR imaging of stepped-frequency based on image contrast optimization

CHEN Jie, XIAO Huaitie, FAN Hongqi, SONG Zhiyong

(ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In stepped-frequency high resolution ISAR imaging radar, target motions produce the range-Doppler coupling which has a serious effect on the ISAR image. Consequently, a novel motion-parameters estimation method based on the image contrast optimization is proposed. Firstly, the effect of radical velocity and acceleration on Doppler profile contrast function was analyzed. Secondly, after constructing phase compensation term, the radical acceleration was estimated by the Doppler profile contrast function. After the radical acceleration compensation, the radical velocity was estimated by the range profile contrast function. Finally, after motion compensation and range-Doppler algorithm, the high resolution ISAR image was obtained. This method has some advantages of high accuracy and fast computation speed. The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** inverse synthetic aperture radar imaging; stepped-frequency signal; motion compensation; contrast optimization; parameter estimation

由于逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 成像技术能够实现目标的二维高分辨成像,提供更加丰富的目标信息,因而被广泛地应用于飞机目标分类<sup>[1-2]</sup>和战场感知<sup>[3]</sup>。频率步进雷达作为一种重要的距离高分辨雷达,在很多宽频领域被广泛应用,如高分辨距离像 SAR 和 ISAR 等。它在获得距离高分辨的同时,可以降低对数字信号处理机的瞬时带宽要求,因而在工程上得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。

然而,频率步进雷达对目标的径向运动较为敏感,存在距离多普勒耦合<sup>[5]</sup>。在目标运动条件下,特别是目标高速运动时,速度将会使一维距离像产生距离走动、波形失真和能量分散,造成一维距离像分辨率下降,测速精度降低和信噪比减

小<sup>[6-7]</sup>,因而频率步进 ISAR 成像关键在于运动参数估计和运动误差补偿。文献[8-9]利用最小熵方法估计径向加速度,这种方法利用搜索来进行参数估计,运算效率较低,且在低信噪比下全局寻优极易失败,实时性较差。文献[10-11]基于相邻相关法估计运动参数,但当散射点较多时,该法运算量较大。文献[12]通过回波包络的运动量来拟合目标运动参数,其估计误差较大,易使合成距离像主瓣展宽。文献[13]利用二维图像对比度最大估计加速度和速度,该法需要同时二维搜索参数,计算量大。本文分析了运动对频率步进信号成像的影响,针对运动参数的估计,提出了一种新的估计方法,即分别基于多普勒像、距离像对比度最优来估计径向加速度和径向速度。

\* 收稿日期:2013-05-19

作者简介:陈杰(1985—),男,湖南双峰人,博士研究生,E-mail:nudatr\_cj@163.com;

肖怀铁(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:htxiao@126.com

## 1 频率步进信号 ISAR 回波信号模型

假设雷达发射  $M$  组频率步进信号, 每组脉冲个数为  $N$ , 其波形表示为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - nT_r}{T_p}\right) \exp(j2\pi(f_0 + n\Delta f)t) \quad (1)$$

其中  $T_r$  为脉冲重复周期,  $T_p$  为脉冲宽度,  $f_0$  为载频初值,  $\Delta f$  为频率步进长度。在较短的成像观测时间内, 目标相对于雷达的运动可以视为匀加速运动, 则在  $t$  时刻, 目标上  $P$  点到雷达的距离可表示为

$$R(t) = R_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \quad (2)$$

式中,  $R_0$  为初始时刻  $P$  点到雷达中心的距离,  $v$  和  $a$  分别是目标上  $P$  点相对于雷达运动的初始径向速度和径向加速度。将式(2)代入式(1), 当  $t = mNT_r + nT_r$  时, 经混频、抽样后可得到  $P$  点的回波信号为

$$s_r(n, m) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - nT_r - \tau}{T_p}\right) \cdot \exp(-j2\pi(f_0 + n\Delta f)\tau) \quad (3)$$

式中  $\tau = 2R(t)/c$ ,  $c$  为光速。从式(3)中可得到回波的相位为

$$\varphi = \frac{-4\pi}{c}(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5 + \phi_6 + \phi_7) \quad (4)$$

其中:

$$\phi_1 = f_0 R_0, \phi_2 = n\Delta f R_0, \phi_3 = mf_0 v NT_r$$

$$\phi_4 = n(f_0 v T_r + \Delta f v m NT_r + f_0 a m NT_r^2 + \frac{1}{2}\Delta f(m NT_r)^2)$$

$$\phi_5 = n^2(\Delta f v T_r + \frac{1}{2}f_0 a T_r^2 + \Delta f a m NT_r^2)$$

$$\phi_6 = \frac{1}{2}n^3 \Delta f a T_r^2, \phi_7 = \frac{1}{2}a f_0 (m NT_r)^2$$

由式(4)可知,  $\phi_1$  是常数项, 对成像没有影响;  $\phi_2$  是目标距离决定的合成距离像位置;  $\phi_3$  是各脉组之间的方位相位项, 对距离像没有影响;  $\phi_4$  是  $n$  的一次项, 会引起距离像包络移动;  $\phi_5$  是  $n$  的二次项, 将导致距离像主瓣展宽, 分辨率下降;  $\phi_6$  是  $n$  的三次项, 会使得距离像主瓣非对称展宽;  $\phi_7$  是方位相位的二次项, 会导致多普勒像中主瓣展宽。因此, 需要对  $\phi_4, \phi_5, \phi_6, \phi_7$  项进行补偿, 以减小或消除其对成像的影响。

由文献[11]可知, 对于速度、加速度补偿的精度要满足

$$\Delta v \leq \frac{\lambda_0}{4NT_r} \quad (5)$$

$$\Delta a \leq \frac{\lambda_0}{4(NT_r)^2} \quad (6)$$

## 2 基于图像对比度最优的运动参数估计

由前面分析可知, 目标径向运动引起的相位项如果得不到补偿, 将导致成像后的图像散焦。因而频率步进雷达 ISAR 成像的关键是运动补偿, 而其中运动参数的估计精度决定能否使图像最优聚焦。因此, 针对运动参数估计, 本文提出了一种基于图像对比度最优的估计方法。

图像对比度与图像聚焦之间的关系为: 一是图像对比度反映图像聚焦深度, 当图像对比度达到最大值时, 图像聚焦效果最优; 二是当图像中不存在相位误差(图像完全聚焦时), 图像对比度达到最大值。文献[14]给出了图像对比度的精确定义: 图像对比度函数  $C(\alpha)$  是图像亮度的标准偏差和平均值的比值, 记作

$$C(\alpha) = \frac{\sqrt{A\{[I^2(n, \alpha) - A(I^2(n, \alpha))]\}^2}}{A(I^2(n, \alpha))} \quad (7)$$

其中  $I(n, \alpha)$  表示一维图像的幅度,  $\alpha$  是对相位误差系数的一个估计值,  $A(\cdot)$  表示空间求平均值运算。对于一个实序列  $x(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$ ,  $A(x(n))$  就表示该序列的平均值, 即

$$A(x(n)) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (8)$$

图像对比度最优算法是通过不断调整相位误差系数  $\alpha$ , 使得图像达到最优聚焦,  $C(\alpha)$  最大化, 即

$$(\hat{\alpha}) = \underset{\alpha}{\text{argument}}[\max C(\alpha)] \quad (9)$$

### 2.1 基于多普勒像对比度最优的加速度估计

由式(4)可知  $v$  和  $m$  之间的耦合项为  $m$  的一次项, 这只会使得多普勒像移动, 而不会影响多普勒像对比度, 因而多普勒像对比度函数值的大小不受速度的影响。若把不同脉组的第一个子脉冲数据取出, 得到的信号为  $s_r(0, m)$ , 径向加速度的相位补偿因子为

$$H_{CR} = \exp\left(\frac{j2\pi f_0}{c}\beta(m NT_r)^2\right) \quad (10)$$

则补偿后得到的多普勒像为

$$I(k, \beta) = \left| \sum_{m=0}^{M-1} s_r(0, m) \cdot H_{CR} \cdot \exp(j2\pi \frac{km}{M}) \right| \quad (11)$$

其中  $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 。

多普勒像对比度函数为

$$C(\beta) = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (I^2(k, \beta) - \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (I^2(k, \beta)))^2}}{\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (I^2(k, \beta))} \quad (12)$$

$\beta$  的估计误差应满足

$$\Delta\beta \leq \frac{\lambda_0}{4(NMT_r)^2} \quad (13)$$

当  $H_{CR}$  能补偿掉径向加速度引起的相位误差时,式(12)的多普勒像对比度函数达到最大值,从而使多普勒像达到最优聚焦,此时径向加速度的最优估计值就为  $\beta$ 。而当  $H_{CR}$  不能补偿相位误差时,式(12)的函数将达不到最大值,表现为多普勒像出现散焦,此时需调整参数  $\beta$  来寻找图像对比度函数最大值。

## 2.2 基于距离像对比度最优的速度估计

在得到径向加速度的最优估计值后,由式(13)可知,估计的径向加速度满足式(6)的要求,于是可以补偿掉径向加速度引起的相位误差。经径向加速度补偿后,距离像中的剩余相位误差可看成只受径向速度的影响。因此,通过求得距离像对比度函数的最大值,可以得到径向速度的估计值。

设当  $m = 0$  时,经过径向加速度补偿后的第一个脉组的子脉冲数据为  $s_r(n, 0)$ ,同时径向速度的相位补偿因子为

$$H_R = \exp\left(\frac{j4\pi f_0}{c} \alpha n T_r\right) \quad (14)$$

则补偿后得到的距离像为

$$I(k, \alpha) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} s_r(n, 0) \cdot H_R \cdot \exp\left(j2\pi \frac{kn}{N}\right) \right| \quad (15)$$

其中  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

距离像对比度函数为

$$C(\alpha) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (I^2(k, \alpha) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (I^2(k, \alpha)))^2}}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (I^2(k, \alpha))} \quad (16)$$

由式(5)可知  $\alpha$  的估计误差应满足

$$\Delta\alpha \leq \frac{\lambda_0}{4NT_r} \quad (17)$$

当  $H_R$  能补偿径向速度带来的相位误差时,式(16)的距离像对比度函数达到最大值,从而使得距离像达到最优聚焦,此时径向速度的最优估计值就为  $\alpha$ 。反之要通过调整  $\alpha$  使得距离像对比度

函数达到最大值。

由于径向速度和径向加速度分别对于多普勒像和距离像的对比度函数影响不同:多普勒像对比度函数不受径向速度影响;距离像对比度函数同时受到径向速度和径向加速度的影响。径向加速度引起的影响大小又受到雷达参数和径向速度的影响。因而利用多普勒像对比度函数只能估计径向加速度,而利用距离像对比度函数同时估计径向加速度和径向速度时,估计精度难以保证。为了实现运动参数的精确估计,利用图像对比度最优估计运动参数分为两步:首先利用多普勒像对比度最优估计径向加速度;补偿完径向加速度的影响后,利用距离像对比度最优估计径向速度。主要步骤为:

- (1) 提取载频  $f_0$  对应的回波信号  $s_r(0, m)$ 。
- (2) 确定参数  $\beta$  的调整区间,根据  $\beta$  的最小误差要求调整其值来计算  $C(\beta)$ 。
- (3) 求得使  $C(\beta)$  最大时对应的  $\beta$ ,即为径向加速度的最优估计值。
- (4) 将估计的径向加速度对距离像进行补偿后,提取第一个脉组对应的数据  $s_r(n, 0)$ 。
- (5) 确定参数  $\alpha$  的调整区间,根据  $\alpha$  的最小误差要求调整其值来计算  $C(\alpha)$ 。求得  $C(\alpha)$  最大时对应的  $\alpha$ ,即为径向速度的最优估计值。

## 3 仿真实验

仿真时采用的频率步进信号主要参数设置为: $N = 64$ ,  $PRF = 20\text{kHz}$ ,  $M = 100$ ,  $f_0 = 10\text{GHz}$ ,  $\Delta f = 2\text{MHz}$ 。目标模型如图 1 所示,目标在直角坐标系中的位置为  $(-50\text{m}, 0\text{m})$ ,且速度为  $v = 270\text{m/s}$ ,速度方向与  $x$  轴正向夹角为  $1^\circ$ ,雷达位于  $(0\text{m}, -8000\text{m})$  处。由文献[15]中的式(33)、(34)可知,目标径向速度为  $3.04\text{m/s}$ ,径向加速度为  $9.09\text{m/s}^2$ 。在仿真中对回波加入一定信噪比的零均值高斯白噪声。

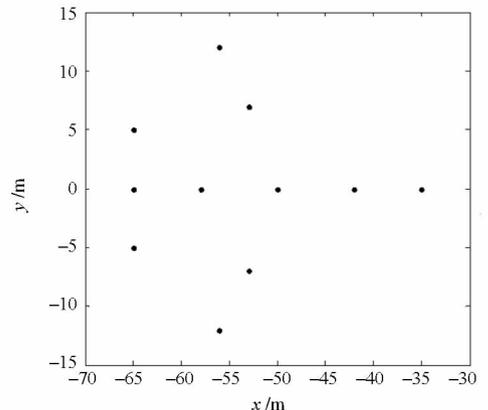
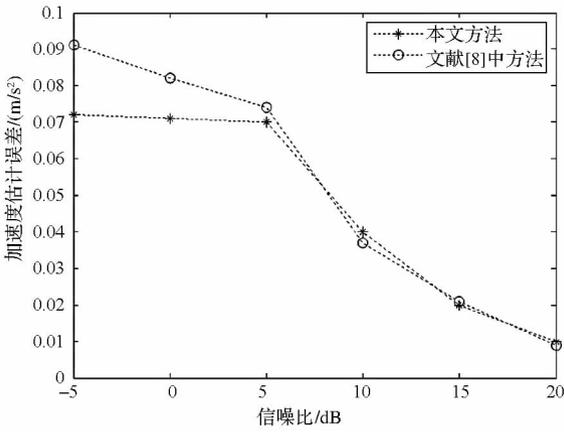


图 1 目标散射点模型

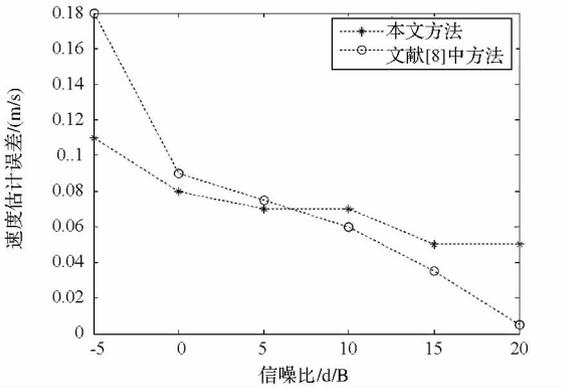
Fig. 1 Model of target scattering points

利用多普勒像对比度最优进行加速度估计时,设加速度搜索范围为 $[5\text{m/s}^2, 15\text{m/s}^2]$ ,搜索间隔为 $0.01\text{m/s}^2$ 。在加速度补偿后,利用距离像对比度最优估计速度的取值范围为 $[0\text{m/s}, 20\text{m/s}]$ ,搜索间隔为 $0.01\text{m/s}$ 。在不同的信噪比条件下,做 100 次 Monte Carlo 试验。图 2 给出了本文方法和文献[8]中提出的运动参数估计方法在不同信噪比下的径向加速度、径向速度估计误差,其中图 2(a)为径向加速度估计误差,图 2(b)为径向速度估计误差。从图中可知,两种方法的参数估计精度都较高,但当信噪比低于 5dB 时,本文提出的方法的估计精度要高于文献[8]中方法的估计精度。



(a) 径向加速度估计误差

(a) Estimated errors of radical acceleration



(b) 径向速度估计误差

(b) Estimated errors of radical velocity

图 2 估计误差

Fig. 2 Estimated errors

在 10dB 信噪比的条件下,图 3 给出了多普勒像对比度函数,从图中可知多普勒像对比度函数对加速度的变化敏感,利用多普勒像对比度最优估计的径向加速度为 $9.05\text{m/s}^2$ ,与径向加速度真实值之间的误差为 $0.04\text{m/s}^2$ ,这满足式(13)的要求。将估计的径向加速度用于补偿后,图 4 给

出了距离像对比度函数,从图中可知距离像对比度函数容易受到速度的影响。当距离像对比度函数达最大值时,对应的径向速度为 $3.00\text{m/s}$ ,与径向速度真实值之间的误差为 $0.04\text{m/s}$ ,这满足式(17)的要求。此时,利用估计的运动参数对回波进行运动补偿后得到的二维 ISAR 像如图 5 所示。可见,在较高信噪比条件下,本文提供的方法能够得到良好的成像效果。

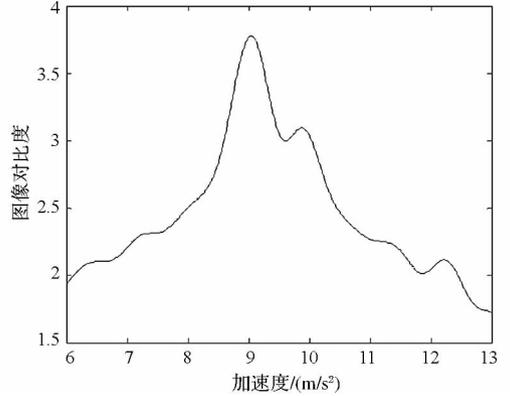


图 3 多普勒像对比度函数

Fig. 3 Contrast function of Doppler profile

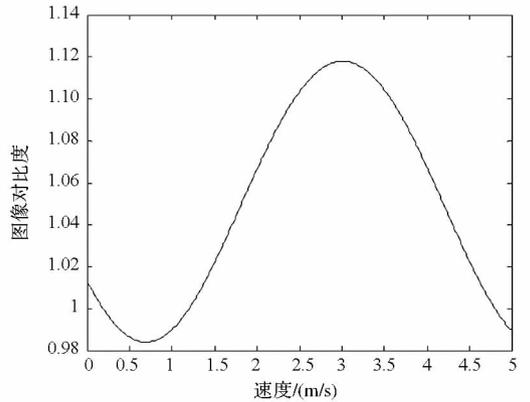


图 4 距离像对比度函数

Fig. 4 Contrast function of range profile

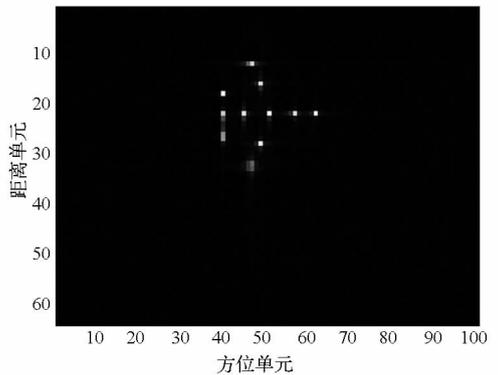


图 5 10dB 时本文方法实现的 ISAR 成像结果

Fig. 5 ISAR image using contrast optimization with SNR = 10dB

信噪比为 -5dB 时,图 6 为利用图像对比度最优方法实现的目标二维 ISAR 像,图 7 为利用

文献[8]中提出的方法实现的目标二维 ISAR 像。可见利用图像对比度最优估计运动参数的方法具有较高的精度,运动补偿后能够得到聚焦良好的成像效果。虽然在低信噪比下,点的清晰度由于噪声的影响有些降低,但总的来说,图像聚焦效果较好,故该方法是可行且非常有效的。

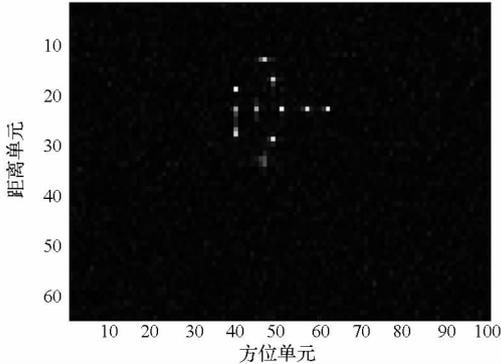


图 6 -5dB 时本文方法实现的 ISAR 成像结果

Fig. 6 ISAR image using contrast optimization with SNR = -5dB

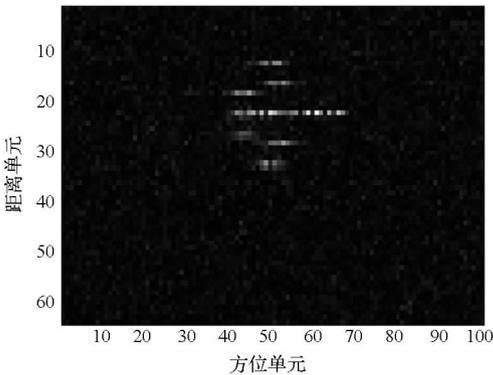


图 7 -5dB 时文献[8]中方法实现的 ISAR 成像结果

Fig. 7 ISAR image using the method in [8] with SNR = -5dB

## 4 结束语

本文针对频率步进雷达 ISAR 成像中的运动参数估计,提出了一种基于图像对比度最优的运动参数估计方法。该法分别基于多普勒像、距离像对比度最优估计径向加速度和径向速度。仿真结果表明该方法精确地测量到目标运动参数,能够得到高分辨的 ISAR 成像。此外,当目标径向速度较大时,可以先对速度进行粗估计,然后在粗估计值附近取值来搜索距离像对比度函数最大值,这样可大大减小搜索的范围和运算量。

## 参考文献 (References)

[1] Botha E C. Classification of aerospace targets using superresolution ISAR images [C]//Proceedings of the 1994 IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing, 1994:138-145.  
[2] Fechner T, Hantsche R, Tanger R. Classification of objects in

ISAR imagery using artificial neural networks [C]//Proceedings of the SPIE: The International Society for Optical Engineering, 1996:339-345.  
[3] Fennell M T, Wishner R P. Battlefield awareness via synergistic SAR and MTI exploitation [J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 1998, 13(2):39-43.  
[4] 毛二可, 龙腾, 韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理 [J]. 航空学报, 2001, 22(6):16-25.  
MAO Erke, LONG Teng, HAN Yueqiu. Digital signal processing of stepped-frequency radar [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(6):16-25. (in Chinese)  
[5] Gill G S. Simultaneous pulse compression and Doppler processing with step frequency waveform [J]. Electronics Letters, 1995, 32(23):2178-2179.  
[6] 郭昕, 李阳, 龙腾. 多目标环境下合成宽带雷达运动补偿方法研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(3):492-503.  
GUO Xi, LI Yang, LONG Teng. Compound wideband radar motion compensation method with multi-targets [J]. Scientia Sinica (Information), 2010, 40(3):492-503. (in Chinese)  
[7] Zhang Q, Jin Y Q. Aspects of radar imaging using frequency-stepped chirp signals [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006, 10(1):1-8.  
[8] 罗贤全, 于久恩, 何强, 等. 基于参数估计的步进频 ISAR 成像运动补偿方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9):1464-1468.  
LUO Xianquan, YU Jiuen, HE Qiang, et al. Stepped-frequency moving compensation method of ISAR imaging based on estimating of target moving parameters. Systems Engineering and Electronic, 2007, 29(9):1464-1468. (in Chinese)  
[9] 李亚超, 梁毅, 邢孟道, 等. 基于线性调频步进 ISAR 参数估计和成像算法研究 [J]. 电子学报, 2008, 36(12):2464-2472.  
LI Yachao, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Estimation of motion parameters and research of imaging algorithm based on LMFS ISAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12):2464-2472. (in Chinese)  
[10] Li Y C, Zhang L, Liu B C, et al. Stepped-frequency inverse synthetic aperture radar imaging based on adjacent pulse correlation integration and coherent processing [J]. IET Signal Processing, 2011, 5(7):632-642.  
[11] 全英汇, 李亚超, 邢孟道, 等. 基于相干化处理的步进频率 ISAR 成像算法研究 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8):1817-1824.  
QUAN Yinghui, LI Yachao, XING Mengdao, et al. Study on LMFS ISAR imaging algorithm based on coherence processing [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(8):1817-1824. (in Chinese)  
[12] Jeong H R, Kim H T, Kim D H. Application of subarray averaging and entropy minimization algorithm to stepped-frequency ISAR autofocus [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(4):1144-1154.  
[13] Martorella M, Berizzi F, Haywood B. Contrast maximisation based technique for 2D ISAR autofocus [J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(4):253-262.  
[14] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al. Phase gradient autofocus-A robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3):827-835.  
[15] Berizzi F, Martorella M, Cacciamano A, et al. A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10):3053-3062.