

# SAR 振动目标成对回波聚焦的改进 Keystone 变换算法

张 远 付锦斌 麦超云 孙进平

(北京航空航天大学, 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 在高分辨率 SAR 成像中, 成对回波是振动目标典型的多普勒特征, 常规聚焦成像算法处理后会呈现散焦现象, 不利于对目标振动参数的分析。本文提出了一种振动目标成对回波的聚焦算法。在推导振动目标二维频域解析式基础上, 采用 Keystone 变换进行徙动校正, 接着在距离-多普勒域中完成二次相位误差补偿, 实现了振动目标与静止目标的同时聚焦。该方法不需要振动目标先验知识, 适合对不同振动状态下多目标成对回波的聚焦, 点目标仿真验证了算法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 振动目标; 成对回波; Keystone 变换

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2013)11-1457-06

## Improved Keystone Transform Algorithm For Paired Echoes Focusing of SAR Vibrating Targets

ZHANG Yuan FU Jin-bin MAI Chao-yun SUN Jin-ping

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Paired echoes are the typical Doppler characteristics of vibrating targets in high resolution synthetic aperture radar (SAR). Conventional imaging algorithms produce smeared paired echoes which is not conducive to the analysis of vibrating parameters. A paired echoes focusing algorithm for vibrating targets is proposed. On the basis of the analytic formula derivation in 2-D frequency domain for vibrating targets, Keystone transform is employed to perform migration correction. Then the quadratic phase error is compensated in the Range-Doppler domain. Finally, the vibrating targets and the stationary targets can be well focused contemporaneously. The proposed algorithm needs no prior knowledge of vibrating targets, so it can be used for the imaging of multiple targets at different vibrating state. The simulation results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); vibration; paired echoes; Keystone transform

### 1 引言

运动目标在雷达视线方向上存在小幅度非匀速运动, 且幅度小于分辨单元时, 通常被认为是微动目标。例如车辆引擎盖的振动、直升机螺旋桨转动、弹头的旋转, 甚至是人的行走都会产生微动现象。在雷达观测下, 微动目标会对电磁波产生调制

作用, 与静止目标和典型直线运动目标相比, 微动目标的多普勒频率往往是时变的, 形式复杂。目前国内外已有关于微动目标特性方面的研究和应用, 文献[1]研制出一种基于多普勒效应的目标分类武器装置, 用于在战场上识别轮式车辆、履带车辆和人。文献[2]用 X 波段雷达获取了悬停直升机的微多普勒信号, 通过小波分析提取到主旋翼和尾旋翼

收稿日期: 2013-04-23; 修回日期: 2013-09-04

基金项目: 国家 973 计划项目(2010CB731903)

的微动特征。文献 [3] 获取了人行走时的雷达信号, 并使用短时傅里叶变换对四肢的微动特征进行分析。文献 [4] 研究了任意运动规律的点目标微动特性。文献 [5] 对目标微动特性研究进展做了深入分析。文献 [6] 给出了基于多普勒谱的微动参数估计方法。由于振动目标的幅度一般远小于分辨率, 因此是一种典型的微多普勒现象。利用 SAR 回波信号检测振动目标, 并估计其振动参数, 有助于实现对目标的鉴别<sup>[7-10]</sup>。

在使用常规 SAR 成像算法时, 振动目标成对回波会发生散焦<sup>[7][9]</sup>。振动目标成像首要解决的问题就是成对回波的聚焦。文献 [7] 给出了一种极坐标格式下近似补偿方法。文献 [11] 对微动目标做了深入研究, 并介绍了基于多普勒域级联 Keystone 变换方法实现了微动目标的聚焦, 但是在二维频域补偿方位向二次相位时, 由于补偿因子中含有随距离时间变化的参数, 频率域无法为时变参数提供支持, 因此补偿会存在误差, 静止目标也会受到影响, 降低了实用性。

本文在二维频域进行 Keystone 变换实现徙动校正的基础上, 在距离-多普勒域完成二次相位补偿, 有效地解决了二次相位补偿存在误差的问题。同时校正了振动目标与静止目标徙动曲线, 并对二次相位误差实现完全补偿, 最终振动目标主像聚焦于振动中心, 成对回波和静止目标也同时聚焦。本方法不需要振动目标先验知识, 适合不同振动状态下的多目标聚焦。

$$R(t) = \sqrt{(r(t) \cos \theta_0 \sin \varphi_0 + x_0)^2 + (r(t) \sin \theta_0 \sin \varphi_0 - \nu_a t)^2 + (r(t) \cos \varphi_0 - h)^2} \quad (2)$$

其中  $\theta_0$  是  $cx$  轴与  $OX$  轴夹角,  $\nu_a$  是飞行速度,  $h$  是飞行高度。式 (2) 进一步推导得到,

$$R(t) = \sqrt{R_c^2(t) + r^2(t) + 2x_0 r(t) \cos \theta_0 \sin \varphi_0 - 2\nu_a t \cdot r(t) \sin \theta_0 \sin \varphi_0 - 2h \cdot r(t) \cos \varphi_0} \quad (3)$$

其中  $R_c(t)$  是天线相位中心至振动中心  $c$  的瞬时斜距值。由菲涅尔近似以及  $r(t) \ll R_c(t)$  得到,

$$R(t) = R_c(t) + r(t) (\cos(\beta + \theta_0) \sin \theta_L \sin \varphi_0 - \cos \theta_L \cos \varphi_0) \quad (4)$$

其中  $\theta_L$  是天线相位中心相对振动中心的俯视余角, 在一个合成孔径时间内认为不随慢时间变化。于是多普勒频率可以表示为,

$$f_d(t) = -\frac{2}{1} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{2\nu_a^2}{1R_0} t + \frac{2}{1} A \omega_m \sin(\omega_m t + \varphi_m + \Phi(t)) \quad (5)$$

## 2 振动目标多普勒特性分析

首先简要分析振动目标的多普勒频率特征。振动目标运动坐标系如图 1 所示, 坐标系  $x'y'z'$  是通过坐标系  $XYZO$  进行平移和旋转得到的, 目标在  $x'z'$  坐标平面内的  $cA$  线段上以点  $c$  为中心做简谐振动, 线段  $cA$  与  $z'$  轴的夹角为  $\varphi_0$ 。简谐振动公式如式 (1),

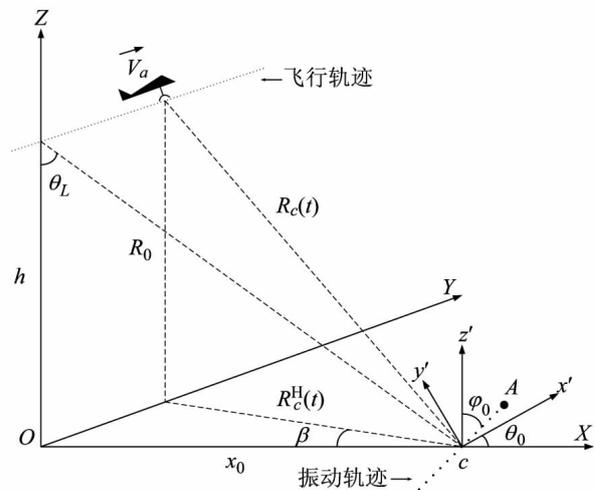


图 1 几何模型

Fig. 1 Acquisition Geometry of Vibrating Target

$$r(t) = A \cos(\omega_m t + \varphi_m) \quad (1)$$

其中  $A$  是振幅,  $\omega_m$  为振动频率,  $\varphi_m$  为初相。  $r(t)$  即为振动目标的瞬时振动幅度,  $t$  为慢时间。根据图 1 的几何模型和公式 (1), 采用正侧视模型, 推导出振动目标的斜距公式,

其中  $\Phi(t)$  是天线相位中心相对于振动中心运动所产生的时变相位因子, 通常变化量相对于  $\omega_m t$  非常小。式 (5) 表明振动目标的多普勒频率分为两部分, 一部分相当于振动中心静止状态下的线性多普勒频率, 另一部分是由微动引起的正弦调制多普勒频率。

## 3 SAR 振动目标成对回波聚焦的改进 Keystone 变换算法

式 (4) 中  $\theta_0$ 、 $\theta_L$  和  $\varphi_0$  是常数。  $\beta \approx \nu_a t / x_0$ , 在一

个合成孔径时间内变化极小。因此振动目标信号的斜距历史可以归纳为，

$$R(t) = R_{ref}(t) + r \sin(\omega_m t + \varphi_0) \quad (6)$$

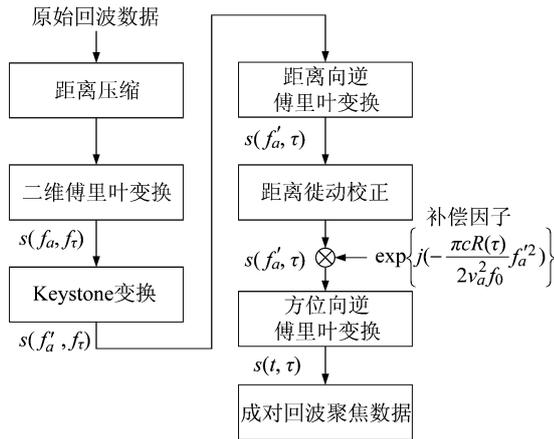


图 2 SAR 振动目标成对回波聚焦的改进 Keystone 变换算法流程图

Fig. 2 Block Diagram of the Improved Keystone Transform Algorithm For Paired Echoes Focusing of SAR Vibrating Targets

其中  $\omega_m = 2\pi f_m$  是振动角频率,  $R_{ref}(t)$  为振动中心的斜距历史,  $r$  是振动幅度。当目标具有平动分量时, 平动引起的多普勒频率是由  $R_{ref}(t)$  的变化产生, 本文不考虑平动问题。

发射信号采用具有线性调频特性的脉冲信号，

$$s(t) = w_r(t) \cdot \exp\{j \cdot (2\pi f_0 t + \pi K_r t^2)\} \quad (7)$$

其中  $f_0$  是雷达载频,  $K_r$  为距离向脉冲的调频率。t 为距离时间, 以脉冲中心为参考原点。  $w_r(t)$  为脉冲包络, 一般假设为矩形。窗函数和散射系数对推导无影响, 信号经过发射、接收和解调, 再经过距离压缩后的信号形式为，

$$s(t, f_t) = \exp\left\{j\left(-\frac{4\pi}{c}(f_0 + f_t) R(t)\right)\right\} \quad (8)$$

其中  $f_t$  是距离频率。将式(6)代入式(8)得到，

$$s(t, f_t) = \exp\left\{j\left[-\frac{4\pi}{c}(f_0 + f_t) R_{ref}(t) - \frac{4\pi}{c}(f_0 + f_t) r \sin(\omega_m t + \varphi_0)\right]\right\} \quad (9)$$

式(9)进一步变换得到，

$$s(t, f_t) = \exp\left\{j\left[-\frac{4\pi}{c}(f_0 + f_t) R_{ref}(t)\right]\right\} \cdot \exp\{j[z \sin(\omega_m t + \varphi_0 + p)]\} \quad (10)$$

其中  $z = 4\pi(f_0 + f_t) r/c$ 。根据雅可比-安格尔恒等式 (Jacobi-Anger)<sup>[12]</sup>, 式(10)展开成级数形式，

$$s(t, f_t) = \exp\left\{j\left(-\frac{4\pi}{c}(f_0 + f_t) R_{ref}(t)\right)\right\} \cdot \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \cdot e^{jn\omega_m t} \cdot e^{jn(\varphi_0 + p)}\right) \quad (11)$$

其中  $J_n(z)$  是第一类贝塞尔函数, 忽略无关相位项  $\exp\{jn(\varphi_0 + p)\}$  式(11)方位向进行傅里叶变换得到，

$$s(f_a, f_t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{4\pi}{c}(f_0 + f_t) R_0 + \frac{\pi c R_0}{2(f_0 + f_t) \nu_a^2} f_a'^2 - \frac{\pi p c R_0 f_m}{(f_0 + f_t) \nu_a^2} f_a + \frac{n^2 \pi c R_0 f_m^2}{2(f_0 + f_t) \nu_a^2}\right)\right\} \quad (12)$$

式(12)中的相位因子总共 4 项, 其中最后一项数值相对于前三项非常小, 可以将其忽略。令

$$\frac{f_a}{f_0 + f_t} = \frac{f'_a}{f_0} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)完成 Keystone 变换，

$$s(f'_a, f_t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{4\pi}{c}(f_0 + f_t) R_0 + \frac{\pi c R_0}{2\nu_a^2 f_0} \left(1 + \frac{f_t}{f_0}\right) f_a'^2 - \frac{\pi p c R_0 f_m}{\nu_a^2} \frac{f'_a}{f_0}\right)\right\} \quad (14)$$

式(14)距离向逆傅里叶变换得到距离-多普勒域表达式，

$$s(f'_a, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{4\pi}{c} f_0 R_0\right)\right\} \cdot \sin c\left(t - \frac{2R_0}{c} \left(1 - \frac{c^2 f_a'^2}{8\nu_a^2 f_0^2}\right)\right) \cdot \exp\left\{j\left(\frac{\pi c R_0}{2\nu_a^2 f_0} f_a'^2 - \frac{\pi p c R_0 f_m}{\nu_a^2} \frac{f'_a}{f_0}\right)\right\} \quad (15)$$

对式(15)做距离徙动校正得到，

$$s(f'_a, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{4\pi}{c} f_0 R_0\right)\right\} \cdot \sin c\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left\{j\left(\frac{\pi c R_0}{2\nu_a^2 f_0} f_a'^2 - \frac{\pi p c R_0 f_m}{\nu_a^2} \frac{f'_a}{f_0}\right)\right\} \quad (16)$$

此时构造参考函数，

$$h(f'_a, t) = \exp\left\{j\left(-\frac{pcR(t)}{2\nu_a^2 f_0} f_a'^2\right)\right\} \quad (17)$$

其中  $R(t)$  表示斜距值, 将式(16)与式(17)相乘, 完成二次相位补偿, 得到相位补偿后的距离多普勒域表达式,

$$s(f'_a, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{4p}{c} f_0 R_0\right)\right\} \cdot \sin c\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{npcR_0 f_m f'_a}{\nu_a^2 f_0}\right)\right\} \quad (18)$$

二次相位补偿步骤放在距离-多普勒域中完成, 这使得二次相位误差被完全补偿。振动目标的能量被校正到同一距离门内, 距离-多普勒域表现为沿方位向的一条直线。式(18)沿方位向进行逆傅里叶变换得到二维时域表达式,

$$s(t, t) = \exp\left\{j\left(-\frac{4p}{c} f_0 R_0\right)\right\} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \cdot \sin c\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \sin c\left(t - \frac{npcR_0 f_m}{\nu_a^2 f_0}\right) \quad (19)$$

式(19)表明振动目标沿方位向聚焦为一系列点, 这些点中  $n=0$  时对应的点称为主像, 由对称性可知, 主像位于振动轨迹中心。其余的点即为成对回波, 以主像为中心沿方位向对称分布。主像和成对回波被校正到同一个距离门内, 斜距值由振动中心的近距离值  $R_0$  决定。主像和成对回波方位向位置表达式为,

$$t = \frac{npcR_0 f_m}{\nu_a^2 f_0} \quad (20)$$

式(20)可以看出, 振动频率越高, 成对回波距离主像将越远, 但是振动频率也存在上限值。式(12)中第4项相位因子在推导中被忽略, 条件是振动频率  $f_m$  应小于方位频率  $f_a$  范围, 而方位频率  $f_a$  受限于  $prf$  值。然而在实际应用中, 这并不需要特别考虑。因为式(5)可以看出, 振动频率  $f_m$  会引起振动目标多普勒频率展宽, 而实际 SAR 系统的  $prf$  值是有限的, 这一对矛盾将决定了能够处理的振动频率  $f_m$  相比于  $prf$  值不会过高。另外由于本文研究对象针对振动目标, 振动幅度  $r$  不能超过一个距离分辨单元。

至此, SAR 振动目标成对回波聚焦的改进 Keystone 变换算法推导完毕。由于整个算法推导并不

关心振动频率  $f_m$  和振动幅度  $r$ , 因此可以用于静止目标和振动目标的同时聚焦。本文算法在推导斜距表达式时采用了正侧视模型, 实际上对于斜视情况也同样适用。

### 4 仿真实验

仿真实验所用参数如表 1 所示。仿真场景示意图如图 3 所示。5 个振动目标被放置于场景中心处, 并沿距离向等间隔排列。同时放置两个静止点目标用作参考点。仿真中  $\varphi_0$  和  $\theta_0$  分别设置为  $70^\circ$  和  $10^\circ$ 。仿真实验设计为两组。第一组实验中 5 个振动目标以相同频率振动, 主要说明本文算法对于振动目标徙动校正的效果; 第二组实验中 5 个振动目标以不同频率振动, 主要说明本文算法适合不同振动状态的目标同时聚焦。

表 1 雷达参数

Tab. 1 Simulation parameters

波段	X
近距 ( $R_0$ )	5000 m
平台速度 ( $\nu_a$ )	100 m/s
脉冲时宽 ( $T_p$ )	1 $\mu$ s
信号带宽 ( $B_s$ )	500 MHz
距离向采样率 ( $F_s$ )	1000 MHz
方位向采样率 ( $PRF$ )	666 Hz

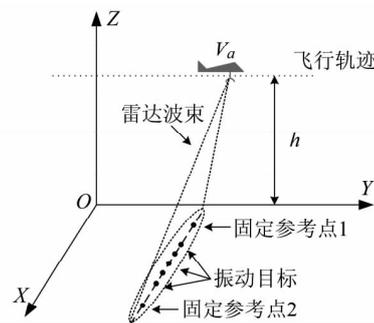


图 3 仿真场景示意图

Fig. 3 The simulation scenes

#### 4.1 振动目标聚焦实验

实验中设置 5 个振动目标的振动频率都为 20Hz, 振动幅度为 0.003 米。

首先采用常规 SAR 成像算法(CS)成像。成像结果如图 4 所示。振动目标主像虽然聚焦, 但是成

对回波明显散焦,能量沿方位向和距离向散开。图 5 显示了振动目标经过常规成像算法处理后的距离-多普勒域结果。与静止目标相比,振动目标的正弦运动分量没有被完全校正,即能量未能校正到同一个距离门内,因此压缩后图像散焦。

接下来使用本文方法重新成像。图 6 是成像后距离-多普勒域结果。振动目标的正弦运动分量完全校正到同一个距离门内。图 7 是成像后二维时域结果。主像和成对回波都已聚焦。

#### 4.2 不同振动状态目标同时聚焦

实验中,按照由近距到远距的顺序,分别设置 5 个振动目标的频率为 5Hz、10Hz、15Hz、20Hz 和 25Hz。图 8 为使用本文方法的成像结果。振动频率数值已标注在相应成对回波的旁边。实验结果表明,振动频率越高,成对回波距离主像就越远。这也正好可以用式(20)来解释,即成对回波方位向位置与振动频率成正比。

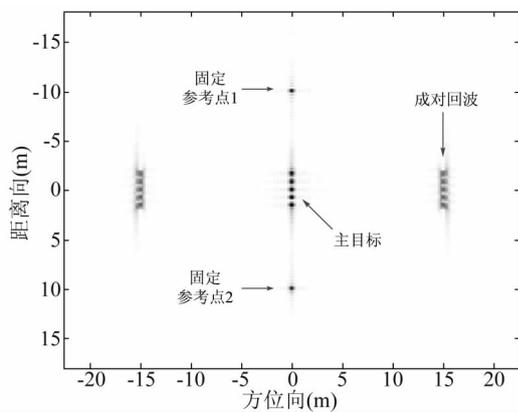


图 4 振动目标 CS 算法成像后的二维时域结果  
Fig. 4 The 2-D time-domain imaging result using CSA

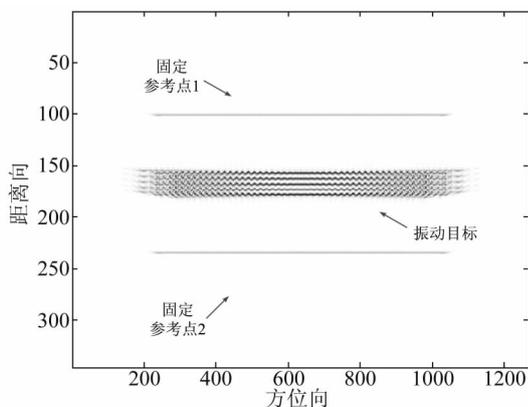


图 5 振动目标 CS 算法成像后的距离-多普勒域结果  
Fig. 5 The Range-Doppler domain imaging result using CSA

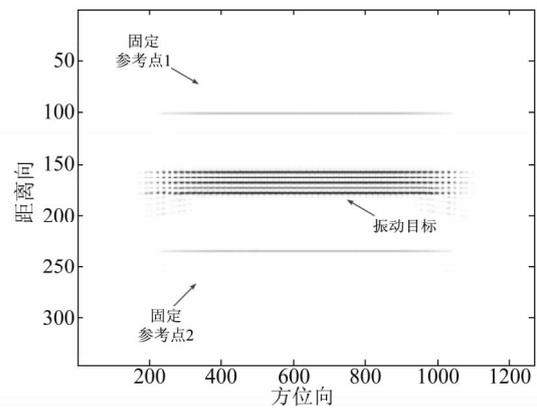


图 6 本文算法成像后的距离-多普勒域结果  
Fig. 6 The Range-Doppler domain imaging result using the presented algorithm

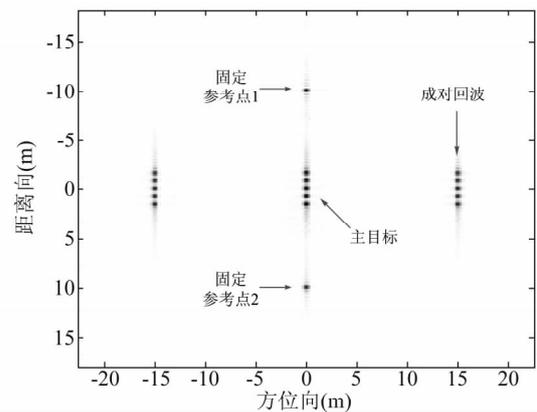


图 7 本文算法成像后的二维时域结果  
Fig. 7 The 2-D time-domain imaging result using the presented algorithm

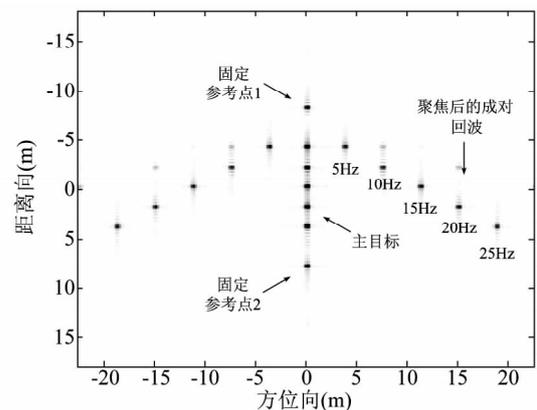


图 8 本文算法对不同振动状态的多目标成像结果  
Fig. 8 The imaging result of vibrating targets in different state using the presented algorithm

## 5 结论

振动目标在常规 SAR 聚焦图像中存在明显的

散焦现象影响到振动目标识别和参数分析的准确性。本文提出了一种振动目标成对回波的聚焦算法,首先采用 Keystone 变换进行徙动校正,接着在距离-多普勒域中完成二次相位误差补偿。点目标仿真结果表明,该方法可以实现振动目标成对回波与静止目标的同时聚焦,同时也能实现不同振动状态的多个目标成对回波的聚焦。该方法对 SAR 微动目标成像及参数提取应用有一定工程应用价值。

#### 参考文献

- [1] A G Stove, S R Sykes. A Doppler-based automatic target classifier for a battlefield surveillance radar [J]. IEE Radar 2002: 419-423.
- [2] T. Thayaparan, et al. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2007, 1(4): 289-299.
- [3] Victor C. Chen. Detection and analysis of human motion by radar [C]. IEEE Radar Conference, 2008: 1-4.
- [4] 陈行勇,刘永祥,黎湘,郭桂荣. 雷达目标微多普勒特征提取[J]. 信号处理. 2007, 23(2): 222-226.  
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, Li Xiang, Guo Gui-rong. Extraction of Micro-Doppler Signatures for Radar Target [J]. Signal Processing. 2007, 23(2): 222-226. (in Chinese)
- [5] 庄钊文,刘永祥,黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报. 2007, 35(3): 520-525.  
Zhuang Zhao-wen, Liu Yong-xiang, Li Xiang. The Achievements of Target Characteristic with Micro-Motion [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA. 2007, 35(3): 520-525. (in Chinese)
- [6] 陈行勇,刘永祥,姜卫东,黎湘,郭桂荣. 微动目标多普勒谱分析和参数估计[J]. 信号处理. 2008, 24(1): 1-6.  
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, Jiang Wei-dong, Guo Gui-rong. Analysis of Doppler Spectrum and Parameters Estimation for Target with Micro-motion [J]. Signal Processing. 2008, 24(1): 1-6. (in Chinese)
- [7] Carrara W. G., Goodman R. S. Majewski R. M. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms (M). Artech House, Norwood, MA, 1995.
- [8] Sparr T. and Krane B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR. IEE Proc. -Radar Sonar Navig [J]. 2003, 150(4): 277-283.
- [9] Rüegg M., Meier E. and Nüesch D. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007, 45(2): 293-304.
- [10] Wang Q., et al. SAR-based vibration estimation using the discrete fractional Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012, 50(10): 4145-4156.
- [11] 邓彬. 合成孔径雷达微动目标指示(SAR/MMTI)研究[D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院. 2011.  
Deng Bin. Research on Synthetic Aperture Radar Micro-Motion Target Indication [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology. 2011. (in Chinese)
- [12] Milton Abramowitz, Irene A. Stegun. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables [M]. New York: Dover, 1964: 355.

#### 作者简介



张远男, 1983年生于四川省雅安市。在北京航空航天大学获得学士和硕士学位。2008-2012年在中国科学院电子学研究所任助理研究员。2013年在北京航空航天大学攻读博士学位。研究方向为高分辨率雷达信号处理。

E-mail: zhangyuaniecas@gmail.com



付锦斌男, 1991年生, 北京航空航天大学 博士生, 研究方向为雷达信号处理。E-mail: fujinbin0721@126.com



麦超云男, 1989年, 在北京航空航天大学 博士生, 研究方向为信号与信息处理。E-mail: maichaoyun@foxmail.com



孙进平男, 1975年生, 北京航空航天大学 教授, 研究方向为高分辨率雷达信号处理、通信及图像中的模式识别、压缩感知、稀疏微波成像等方面的研究。

E-mail: sunjinping@buaa.edu.cn