

# 含旋转部件目标稀疏孔径 ISAR 成像方法

徐艺萌<sup>1</sup>, 管桦<sup>1</sup>, 罗迎<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 马赛<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077; 2. 95853 部队, 北京, 100076)

**摘要** 针对稀疏孔径条件下含旋转部件目标(ISAR)成像质量较差的问题,提出了一种基于子孔径 Chirplet 变换和压缩感知(CS)的含旋转部件目标稀疏孔径 ISAR 成像方法:首先,建立了含旋转部件目标的稀疏 ISAR 成像模型,推导了宽带雷达条件下含旋转部件目标的微多普勒效应,并分析了孔径的稀疏与微多普勒效应共存时对成像的影响;其次将回波信号投影到 Chirplet 变换基,利用目标主体回波信号和微动部件回波信号在 Chirplet 变换投影参数上的差异,有效剔除有效子孔径中的微多普勒调制信号;最后,采用基于正交匹配追踪(OMP)算法的 CS 方法对有效子孔径进行恢复成像,获得了含旋转部件目标的高质量成像结果。仿真实验表明,该方法可以有效消除微多普勒效应和孔径稀疏的干扰,并实现高质量的 ISAR 成像。

**关键词** ISAR;微多普勒;稀疏孔径;Chirplet 变换;压缩感知;正交匹配追踪

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.014

**中图分类号** TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0057-05

## Sparse-Aperture ISAR Imaging for Target With Rotating Parts

XU Yi-meng<sup>1</sup>, GUAN Hua<sup>1</sup>, LUO Ying<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, MA Sai<sup>1</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Unit 95853, Beijing 100076, China)

**Abstract:** To solve the problem of the sparse-aperture ISAR imaging for the target with rotating parts is poorer, a method based on sub-aperture Chirplet transform and Compressed Sensing(CS) is proposed in this paper. Firstly, the sparse ISAR imaging model of the target with rotating parts is established, then the effect of micro-Doppler of the target with rotating parts in broadband radar is deduced, and then the influence of the sparse of aperture and the micro-Doppler together is analyzed. Secondly, the radar echoes are decomposed into a series of Chirplet basis, getting rid of the micro-Doppler signal in sub-aperture based on the difference of the Chirplet parameters of the echo signals of main parts and rotating parts. Finally, to recover the imaging from the subaperture based on the CS method of Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm, getting the high quality imaging results of the target with rotating parts. Simulations show the method could eliminate the micro-doppler effect and achieve high quality imaging.

**Key words:** ISAR; micro-Doppler; sparse aperture; Chirplet; compressed sensing; orthogonal matching pursuit

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)可以实现对运动目标的成像,为目标

收稿日期:2013-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172169);国家自然科学基金青年基金资助项目(61201369,61102109)

作者简介:徐艺萌(1989—),男,江苏盐城人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究。

E-mail: xuxi\_aoman@163.com

识别提供重要信息。在方位积累时间内,雷达工作状态的变化、目标的非合作运动等会导致部分回波信号缺失,从而出现方位孔径稀疏现象<sup>[1]</sup>,影响成像质量。对于稀疏孔径条件下的刚体目标 ISAR 成像,通常可以采用现代谱估计<sup>[2]</sup>或者线性预测参数外推的参数化模型来实现目标成像。然而实际情况中,许多 ISAR 目标存在微动部件,会在一定的姿态角范围内对雷达的载波进行调制,进而产生含有周期性调制成分的雷达回波信号,称为“微多普勒”效应<sup>[3-4]</sup>,导致微动散射点无法实现方位向聚焦,生成方位向条带,从而进一步降低目标成像质量<sup>[5]</sup>。微多普勒谱的调制使得以上方法难以取得理想效果,因此有必要研究新的含微动部件目标稀疏 ISAR 成像方法。

本文主要针对含旋转部件目标稀疏孔径 ISAR 成像问题开展研究,提出了一种基于子孔径线调频小波(Chirplet)变换和压缩感知重构的含旋转部件目标稀疏孔径 ISAR 成像方法。在含旋转部件目标稀疏孔径 ISAR 成像中,对于每一段子孔径而言,在运动补偿后,主体散射点的方位向信号为单频信号;而微动散射点的方位向信号为正弦调频段信号,在较短的子孔径时间内可以近似为线性调频(LFM)信号。Chirplet 变换是一种新的线性时频表示方式,可以理解为“一段被窄窗函数抽取的线性调频波”<sup>[6]</sup>。因此将信号展开为 Chirplet 基函数加权的形式,再根据目标主体回波信号和微动部件回波信

号的差异,可实现目标主体回波信号和旋转部件回波信号的分离。在此基础上,利用目标方位向回波信号在频域的稀疏性,通过引入压缩感知(CS)理论,实现了目标主体的稀疏 ISAR 成像。仿真实验验证了本文所提方法的有效性和鲁棒性。

## 1 含旋转部件的目标稀疏 ISAR 成像模型

设目标模型见图 1,雷达位于坐标原点  $O$  固定不动,目标中心的初始位置位于  $x$  轴上的  $O'(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$  点,并以速度  $v$  沿  $y$  轴方向运动。目标中心到雷达的距离为  $R_{\text{ref}}$ 。目标由初始时刻分别位于坐标  $(x_m, y_m)$  的  $m$  个主体散射点  $P_m$  和初始时刻分别位于坐标  $(x_n, y_n)$  的  $n$  个旋转散射点  $P_n$  构成,每个旋转散射点以不同的旋转半径  $r_n$ 、旋转频率  $\omega_n$  和初始相位  $\theta_{n0}$  绕  $C$  点旋转, $C$  点的初始时刻坐标为  $(x_c, y_c)$ 。

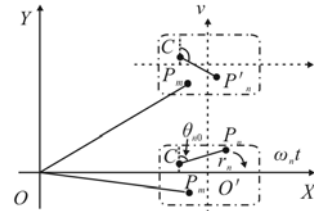


图1 雷达和含旋转部件目标几何关系图

Fig. 1 The geometric diagram of radar and target with rotation part

设雷达发射  $f_c$  是载频,  $T_p$  是脉冲宽度,  $\mu$  是调频频率的线性调频信号,目标回波信号为:

$$s(t, \tau) = \sum_{k=1}^m \sigma_{mk} \text{rect} \left[ \frac{t - 2R_{mk}(\tau)/c}{T_p} \right] \exp \left\{ j2\pi \left[ f_c \left( t - \frac{2R_{mk}(\tau)}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left( t - \frac{2R_{mk}(\tau)}{c} \right)^2 \right] \right\} + \sum_{l=1}^n \sigma_{nl} \text{rect} \left[ \frac{t - 2R_{nl}(\tau)/c}{T_p} \right] \exp \left\{ j2\pi \left[ f_c \left( t - \frac{2R_{nl}(\tau)}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left( t - \frac{2R_{nl}(\tau)}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

式中  $\sigma_{mk}$ 、 $\sigma_{nl}$  和  $R_{mk}(\tau)$ 、 $R_{nl}(\tau)$  分别为第  $k$  个主体散射点和第  $l$  个旋转散射点的反射系数和在慢时间  $\tau$  距雷达的距离;  $c$  为光速;  $t$  为快时间。假设目标中心为参考点,则参考信号为:

$$s_r(t, \tau) = \text{rect} \left[ \frac{t - 2R_{\text{ref}}(\tau)/c}{T_{\text{ref}}} \right] \exp \left\{ j2\pi \left[ f_c \left( t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau)}{c} \right) + \frac{1}{2} \mu \left( t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau)}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

式中  $T_{\text{ref}}$  是参考信号的持续时间。式(1)和式(2)共轭相乘,即对回波信号进行“dechirp”处理,然后进行快时间傅里叶变换,并去除剩余视频相位(RVP)和包络斜置项后<sup>[7]</sup>,得到:

$$S_c(f, \tau) = \sum_{k=1}^m \sigma_{mk} T_p \text{sinc} \left[ T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(\tau) \right) \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{mk}(\tau) \right] + \sum_{l=1}^n \sigma_{nl} T_p \text{sinc} \left[ T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{nl}(\tau) \right) \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{nl}(\tau) \right] \quad (3)$$

式中:

$$\Delta R_{mk}(\tau) \approx R_{mk}(0) - R_{\text{ref}}(0) + \left[ y_{mk} \frac{v\tau}{R_{mk}(0)} - y_{\text{ref}} \frac{v\tau}{R_{\text{ref}}(0)} \right] \quad (4)$$

$$\Delta R_{nl}(\tau) \approx R_c(0) - R_{\text{ref}}(0) + \left[ y_c \frac{v\tau}{R_c(0)} - y_{\text{ref}} \frac{v\tau}{R_{\text{ref}}(0)} \right] + r_{nl} \cos(\omega_{nl}\tau + \theta_{nl0}) \quad (5)$$

式中:  $R_{mk}(0)$  为初始时刻主体散射点  $P_{mk}$  距雷达的距离;  $R_C(0)$  为初始时刻 C 点到雷达距离;  $\theta_{n0}$  是第 1 个旋转散射点的初始相位。对式(4)、式(5)相位关于  $\tau$  求导得:

$$\begin{aligned} f_m &= \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{v_{y_{mk}}}{R_{mk}(0)} - \frac{v_{y_{ref}}}{R_{ref}(0)} \right] \\ f_r &= \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{v_{y_C}}{R_C(0)} - \frac{v_{y_{ref}}}{R_{ref}(0)} - r_{nl} \omega_{nl} \sin(\omega_{nl} \tau + \theta_{n0}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

可见主体散射点信号在方位向是单频信号,对主体散射点信号在方位向做傅里叶变换,就能够得到对应散射点频率分量的峰值,从而实现主体散射点的方位向聚焦。旋转散射点信号在方位向是正弦调频信号,无法在方位向聚焦,从而影响成像质量。

假设在 ISAR 成像时间内,为了获得一定的方位向分辨率,雷达共需要发射  $N$  个脉冲,但稀疏孔径 ISAR 成像条件下,由于回波信号的缺失,雷达只接收到了  $H$  段子孔径回波信号,共包括  $X$  次脉冲回波 ( $X < N$ ), 见图 2。

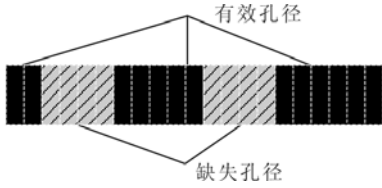


图2 目标回波信号示意图

Fig. 2 Echo signal of the target

假设第  $h$  ( $h=1, 2, \dots, H$ ) 段子孔径中包含  $N_h$  次脉冲回波,这  $N_h$  次脉冲在总的  $N$  个脉冲中序号分别为  $h_{N_1}, h_{N_2}, \dots, h_{N_{N_h}}$  则主体散射点的方位向回波信号和旋转散射点的方位向回波信号可记为:

$$\begin{aligned} S_m(f, \tau_h) &= \sum_{k=1}^{m} \sigma_{mk} T_p \text{sinc} \left[ T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(\tau_h) \right) \right] \\ &\exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{mk}(\tau_h) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S_r(f_r, \tau_h) &= \sum_{l=1}^{n} \sigma_{nl} T_p \text{sinc} \left[ T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{nl}(\tau_h) \right) \right] \\ &\exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{nl}(\tau_h) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\tau_h = (h_{N_1}, h_{N_2}, \dots, h_{N_{N_h}}) / \text{PRF}$ ,  $h$  ( $h=1, 2, \dots, H$ ), PRF 为雷达脉冲重复频率。显然,由于孔径的缺失,直接对  $\tau_h$  做傅里叶变换是无法实现方位向聚焦的。

## 2 基于子孔径 Chirplet 变换的微多普勒信号分离

由第 1 节可知,主体散射点方位向回波在每一段子孔径内仍然近似为单频信号。旋转散射点方位

向回波在子孔径内,可以近似为一段或若干段线性调频信号的叠加。Chirplet 变换能够方便的实现信号在二阶相位上的分解与重构,将信号近似为高斯包络的线性调频信号和。当 Chirplet 具有光滑的高斯包络时,其基函数可以表示如下:

$$g_n(t) = (\pi \sigma_n^2)^{-0.25} \exp \left\{ -\frac{(t-t_n)^2}{2\sigma_n^2} + j\omega_n(t-t_n) + j\beta(t-t_n)^2 \right\} \quad (9)$$

式中  $\sigma_n, t_n, \omega_n, \beta_n$  分别表示 Chirplet 时间的宽度、时间中心、初始频率和调频率。待分析信号  $s(t)$  可表示为一组 Chirplet 基  $g_n(t)$  的线性叠加:

$$s(t) = \sum_{n=0}^N C_n g_n(t) \quad (10)$$

因此,我们能够将从  $(f, \tau)$  平面上抽取微动散射点所在距离单元的信号分解为一系列 Chirplet 原子之和。主体散射点回波信号对应的 Chirplet 原子参数  $\beta_{mn}$  模值的理论值为对式(6)关于慢时间  $\tau$  求导数,由于主体散射点为单频信号,因此导数为零,故可以认为主体散射点回波信号对应的参数  $\beta_{mn}$  模值小于一极小的阈值  $|\beta_c|$ 。主体散射点回波信号对应的 Chirplet 原子参数  $\omega_{mn}$  的理论模值为:

$$|\omega_{mn}| = \left| 4\pi/\lambda (v_{y_{mk}}/R_{mk}(0) - v_{y_{ref}}/R_{ref}(0)) \right| \quad (11)$$

旋转散射点回波信号对应的 Chirplet 原子参数  $\beta_{nr}$  模值的理论值为:

$$|\beta_{nr}| = \left| 2/\lambda (r_{nl} \omega_{nl}^2 \cos(\omega_{nl} \tau + \theta_{n0})) \right| \quad (12)$$

$\beta_{nr}$  的模值最大值为  $|\beta_{nr}| = 2r_{nl} \omega_{nl}^2 / \lambda$ , 最小值为 0, 当  $\beta_{nr}$  取最大值时,  $\omega_{nr}$  的模值为:

$$|\omega_{nr}| = \left| 4\pi/\lambda (v_{y_C}/R_C(0) - v_{y_{ref}}/R_{ref}(0)) \right| \quad (13)$$

故可以看出在  $|\omega_{nr}| \approx |\omega_{mn}|$  时,  $|\beta_{nr}| \gg |\beta_{mn}|$ 。当  $\beta_{nr}$  取最小值 0 时,  $\omega_{nr}$  的模值为:

$$|\omega_{nr}| = \left| 4\pi/\lambda (|v_{y_C}/R_C(0) - v_{y_{ref}}/R_{ref}(0)| + r_{nl} \omega_{nl}) \right| \text{ or } \left| 4\pi/\lambda (|v_{y_C}/R_C(0)| - v_{y_{ref}}/R_{ref}(0) - r_{nl} \omega_{nl}) \right| \quad (14)$$

故可以看出  $|\beta_{nr}| \approx |\beta_{mn}|$  时  $|\omega_{nr}| \gg |\omega_{mn}|$ 。

为节省时间,可以首先判定哪些距离单元内存在微多普勒信息。在方位向补零 ISAR 成像后,计算各距离单元信号熵。由于旋转散射点在方位向上的聚焦性较差,导致其所在的距离单元信号的熵值小于仅包含主体散射点的距离单元信号<sup>[7]</sup>,可以判断出旋转散射点所在的距离单元范围。熵的计算公式如下:

$$\begin{aligned} H(f) &= - \sum_{i=1}^N s'(f, \tau_i) \ln s'(f, \tau_i) \\ s'(f, \tau_i) &= \frac{|s(f, \tau_i)|}{\sum_{i=1}^N |s(f, \tau_i)|} \end{aligned} \quad (15)$$

因此,基于 Chirplet 变换的剔除稀疏孔径条件下含旋转部件目标回波微多普勒信息的方法步骤总结如下:①通过对比各距离单元信号熵值,设置阈值,选择熵较大的距离单元进行后续处理;②对选择的每个距离单元信号分别进行 Chirplet 变换,假设某个距离单元信号可以分解为  $N$  个 Chirplet 原子;③通过对 Chirplet 原子参数  $\sigma_n, t_n, \omega_n, \beta_n$  的集合进行对比分析,确定  $\omega_n$  模的阈值  $\omega_x$  和  $\beta_n$  的阈值  $\beta_x$ ;④分析 Chirplet 分解结果,通过剔除调频率  $\beta_n \leq \beta_x$  且初始频率  $\omega_n \geq \omega_x$  的 Chirplet 原子和初始频率  $\omega_n \leq \omega_x$  且  $\beta_n \geq \beta_x$  的 Chirplet 原子,将旋转点回波从所在距离单元信号中剔除;⑤利用剩余的  $M$  个 Chirplet 原子重构对应距离单元的回波信号。

### 3 稀疏孔径 ISAR 成像

CS 理论它关注的是全局信息,通过充分利用信号结构的稀疏特性并对信号进行多次全局的非相关“观测”以实现高维稀疏信号的感知<sup>[8]</sup>。由式(8)可以看出目标方位向信号在频域满足稀疏性,因此可以采用 CS 理论来实现主体的稀疏成像。假设第  $h$  ( $h=1, 2, \dots, H$ ) 段子孔径前一共缺失了  $X$  次脉冲回波,根据孔径的稀疏结构的构造对应的观测矩阵  $\Phi$ ,令:

$$\Phi = \{\varphi_{X,N}\} = \begin{cases} 1, & (h_{N_h} - X, h_{N_h}) \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (16)$$

采用 IDFT 矩阵作为稀疏变换矩阵  $\Psi$ 。为高概率重构原信号,传感矩阵  $\Phi\Psi$  必须满足约束等距性 (Restricted Isometry Property, RIP) 条件<sup>[9-10]</sup>。通过正交匹配追踪法 (OMP)<sup>[10]</sup> 来求解如下最优化数学模型以完成重构:

$$\Theta = \min \|\Psi^H \Phi^H S'_c(f, \tau_h)\|_1, \text{ s. t. } S'_c(f_g, \tau_h) = \Phi X = \Phi \Psi \Theta \quad (17)$$

式中目标函数  $\Theta$  即为所期望的方位向成像结果。

### 4 实验仿真

仿真中,假设雷达位于坐标原点,发射信号载频  $f_c=10$  GHz, PRF=1 500 Hz,带宽 300 MHz 距离分辨率 0.5 m,图 3 给出了目标散射点模型,目标本地坐标系原点  $O$  在雷达坐标系中的坐标为 (30 000, 0) m,平动速度为 300 m/s,目标包含 8 个旋转散射点和 22 个主体散射点,8 个旋转点共分为 4 组,分别环绕 4 个旋转中心,每组 2 个旋转目标点的初始

相位为  $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$  rad,旋转角速度  $\omega=24 \pi$  rad/s,成像时间为 3 s。4 个旋转中心在本地坐标系中的坐标为  $(-10, -3), (10, -3), (-7, 2), (7, 2)$ ,单位为 m。图 3 为目标模型,其中星点为目标主体散射点,黑圆点为目标的旋转散射点的中心。图 4 为稀疏度为 50% 的稀疏孔径条件下目标的距离-慢时间谱图 (即  $|S_c(f, \tau)|$ )。图 5 为采用补零方式获得的目标 ISAR 成像结果,成像质量较差。图 6 为剔除微多普勒信号后目标的距离-慢时间谱图。图 7 为进一步采用压缩感知得到的目标 ISAR 成像结果,成像结果较为理想。图 8 为 -3 dB 噪声条件下的成像结果,仍较为理想,可见该方法有较好的抗噪性。

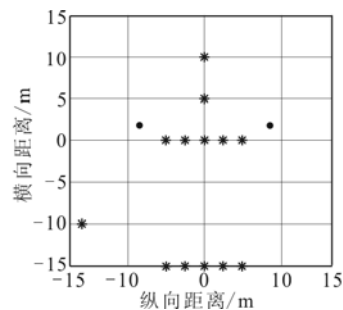


图 3 ISAR 仿真点目标模型

Fig. 3 Simulation of point target model

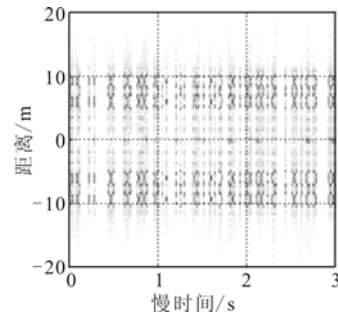


图 4 稀疏度为 50% 距离慢时间谱图

Fig. 4 Range-slow-time spectrogram in the sparsity of 50%

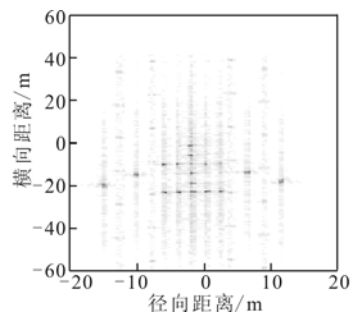


图 5 稀疏孔径条件下的目标二维成像

Fig. 5 The target under the condition of sparse in the 2D imaging

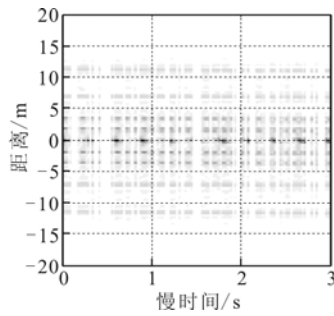


图6 剔除微多普勒信号后  
目标的距离慢时间谱图

Fig. 6 Range-slow-time spectrogram after getting rid of micro-Doppler signal

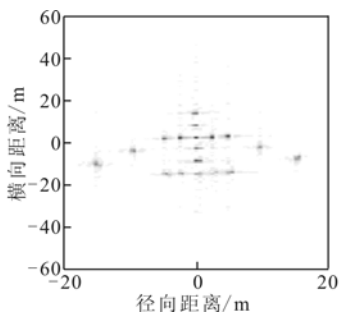


图7 采用压缩感知恢复成像

Fig. 7 Recovery imaging through CS

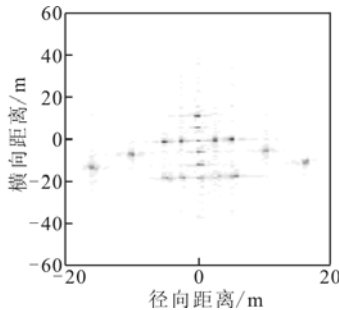


图8 -3 dB目标二维成像

Fig. 8 -3 dB target in the 2D imaging

## 5 结语

本文针对稀疏孔径下的含旋转部件目标的ISAR成像问题,首先使用Chirplet变换对子孔径信号进行分解,有效的剔除了微多普勒信号。进一步对回波信号进行了采用IDFT矩阵作为稀疏变换矩阵的方位向CS重构,并最终得到目标主体散射点的二维ISAR像。仿真实验验证了该方法的有效性和鲁棒性。

### 参考文献(References):

[1] LI Jun, XING Mengdao, ZHANG Lei, et al. High resolution imaging method for the sparse aperture of

ISAR[J]. Journal of Xidian university, 2010, 37 (3): 441-446.

- [2] Li H J, Farhat N, Shen Y. A new iterative algorithm for extrapolation of data available in multiple restricted regions with application to radar imaging [J]. IEEE transactions on antennas propagation, 1987, 35 (5): 581-588.
- [3] 张群,罗迎,何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011, 12(2): 22-26.  
ZHANG Qun, LUO Ying, HE Jin. Review of researches on micro-Doppler effect of radar targets [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(2): 22-26. (in Chinese)
- [4] 李开明,李长栋,李松,等. 基于Gabor变换的微动目标微多普勒分析与仿真[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010, 11(1): 40-43.  
LI Kaiming, LI Changdong, LI Song, et al. Analysis and simulation for micro-Doppler information of micro-motion target based on gabor transformation [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(1): 40-43. (in Chinese)
- [5] Setlur P, Amin M, Thayaparan T. Micro-Doppler signal estimation for vibrating and rotating targets [C]//Proceedings of the eighth international symposium on signal processing and its applications. [S.l.]: IEEE press, 2005: 639-642.
- [6] 尉宇,孙德宝,岑翼刚. 高斯线调频小波变化及参数优化[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(9): 1398-1403.  
WEI Yu, SUN Debao, CEN Yigang. Gaussian chirplet transform and the optimization of its parameters [J]. Journal of electronics & information, 2005, 27 (9): 639-642. (in Chinese)
- [7] 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 technology [M]. Beijing: Electronic industry press, 2005. (in Chinese)
- [8] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE trans information theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [9] Candès E. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. Comptes rendus mathématique, 2006, 346 (9): 589-592.
- [10] Candès E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE trans on info theory, 2006, 52(2): 489-509.

(编辑:徐楠楠)