

基于多项相位变换的 FMCW - ISAR 微多普勒特征提取方法

梁颖¹, 田韵², 张群¹, 朱小鹏¹, 何劲¹, 朱丰¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安, 710077; 2. 95999 部队, 北京, 100078)

摘要 主要研究了调频连续波逆合成孔径雷达(FMCW - ISAR)目标的微多普勒特征及其提取方法。在 FMCW - ISAR 系统中, 脉冲持续时间内微动目标的连续运动将导致一维距离像产生走动和主瓣展宽, 由此引入的误差将影响到后续的微多普勒特征提取以及成像, 利用现有的微多普勒特征提取方法不能得到真实的目标微动特征。针对该问题, 本文首先详细分析了 FMCW - ISAR 目标微多普勒效应的具体表现形式及其特点, 应用多项相位变换的方法对导致一维距离像主瓣展宽和走动的误差相位进行了补偿, 结合扩展 Hough 变换, 提出了一种基于多项相位变换的 FMCW - ISAR 微多普勒特征参数提取方法。论文所提方法在微多普勒曲线产生展宽和走动的情况下, 能准确提取出旋转目标的微多普勒特征参数, 最后仿真实验验证了理论分析结果及所提方法的有效性。

关键词 FMCW - ISAR; 微多普勒特征; 展宽和走动; 多项相位变换

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.02.016

中图分类号 TN957 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)02-0074-05

美国海军研究实验室的 Victor C. Chen 将目标或目标的组成部分除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微小运动统称为微动^[1]。目标的微动会对雷达回波产生附加的频率调制, 使目标主体回波频谱存在旁瓣或展宽, 这种现象被称为微多普勒效应(micro - Doppler effect)^[1-2]。不同的微动特征会对雷达回波产生不同的频率调制, 通过对目标微动特征的分析, 可以有效地分辨不同的目标, 如对弹道导弹飞行中段真假弹头的微动特征进行分析, 能实现真假弹头的分辨^[3-4]。

调频连续波合成孔径雷达(Frequency Modulation Continuous Wave - Synthetic Aperture Radar, FMCW - SAR), 与传统的脉冲式 SAR 相比, 具有体积小、重量轻、成本低、功耗低等优势^[5]。同时, 调频连续波雷达很大的时宽带宽积, 使其难以被传统的侦察机截获, 具有良好的低截获概率^[6]。FMCW 技术与逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)技术相结合具有广阔的应用前景。FMCW 具有较长的脉冲持续时间, 脉冲持续时间内, 目标与雷达之间径向距离的变化会产生多普勒频移, 导致目标一维距离像出现平移和主瓣展宽现象, 所以传统的脉冲式 ISAR 所采用的“走 - 停”模式不再成立, 必须考虑脉冲持续时间内目标连续运动所产生的多普勒频移的影响^[7-9]。这种影响也为 FMCW - ISAR 后续的微多普勒信息提取与成像处理带来问题, 利用现有的微多普勒提取方法不能得到微动目标真实的微动特征。

1 FMCW - ISAR 微多普勒特征分析

旋转和振动是微动目标 2 种典型的运动特征, 以旋转点为例对 FMCW - ISAR 微动特征进行建模分析。含旋转点目标系统模型如图 1 所示, xoy 为本地坐标系, $x'C'y'$ 为目标坐标系。目标主体以速度 v 运动,

* 收稿日期: 2011 - 10 - 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971100)

作者简介: 梁颖(1986 -), 男, 河北唐山人, 硕士生, 主要从事雷达信号处理研究。

E - mail: liangying8633@163.com

运动方向与 x 轴夹角为 γ , 沿 x 轴和 y 轴的速度分别为 v_x 和 v_y 。目标主体上有一旋转点 P 以角速度 ω 绕旋转中心 C_r 旋转, 旋转点初始相位为 θ 。旋转中心与雷达的距离为 R_c , 在本地坐标系的坐标为 (x_c, y_c) 。

雷达发射的 FMCW 信号为锯齿调频波, 发射信号形式的时频关系如图 2 所示, 表达式为:

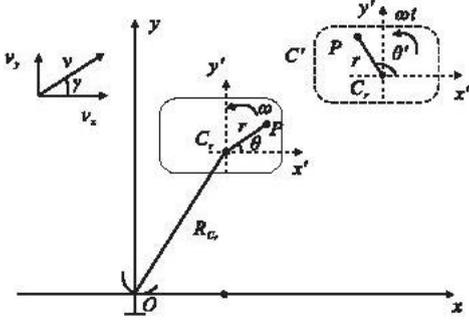


图1 FMCW-ISAR 目标系统模型

Fig. 1 System model of FMCW-ISAR

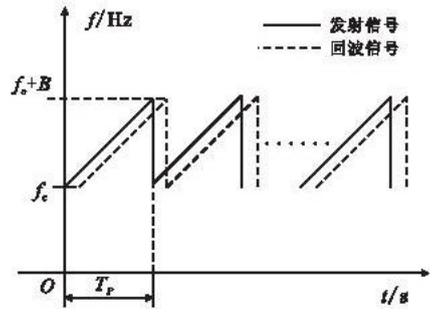


图2 FMCW 信号时频关系图

Fig. 2 Spectrogram of FMCW

$$s(t_k, t_m) = \text{rect}(t_k/T_p) \exp(j2\pi(f_c t + \mu t^2/2)) \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数, $|t| \leq T_p/2$ 时, $\text{rect}(t/T_p) = 1$, $|t| > T_p/2$ 时, $\text{rect}(t/T_p) = 0$; f_c 为信号载频, μ 为信号的调频斜率; T_p 为脉冲持续时间且等于脉冲重复时间 PRI, 带宽 = μT_p ; t_k 为快时间; t 为全时间, 慢时间为 $t_m = mT_p$ ($m = 0, 1, \dots$), 则三者关系为: $t = t_k + t_m$ [11]。

选取目标中心为参考点, 参考点坐标为 (X_C, Y_C) 。考虑快时间 t_k 的影响后, 参考点、旋转中心 C_r 点与雷达之间的距离 $R_{\text{ref}}, R_{C_r}(t_k, t_m)$ 可以分别表示为 [7]:

$$R_{C_r}(t_k, t_m) = \sqrt{(x_{C_r} + v_x t_m + v_x t_k)^2 + (y_{C_r} + v_y t_m + v_y t_k)^2} \approx R_{C_r}(t_m) + \alpha t_k + \beta t_m \quad (2)$$

$$R_{\text{ref}} = \sqrt{(X_C + v_x t_m)^2 + (Y_C + v_y t_m)^2} \quad (3)$$

式中: $R_{C_r}(t_m) = \sqrt{(x_{C_r} + v_x t_m)^2 + (y_{C_r} + v_y t_m)^2}$; $\alpha = \frac{v_x x_{C_r} + v_y y_{C_r}}{R_{C_r}(t_m)}$; $\beta = \frac{v^2}{R_{C_r}(t_m)}$ 。

目标旋转点同样需考虑脉冲持续时间内快时间 t_k 对 FMCW 回波信号的影响, 在脉冲持续时间内旋转点的微小运动可近似认为相对于旋转中心做匀速运动, 即旋转点相对于旋转中心的速度可近似为关于慢时间 t_m 的函数。假设 $v_r(t_m)$ 为旋转点相对于雷达在脉内时间的径向速度, 则旋转点与雷达之间的距离 $R_P(t_k, t_m)$ 可表示为 [2]:

$$R_P(t_k, t_m) = R_P(t_m) + \alpha t_k + \beta t_m t_k + v_r(t_m) t_k \quad (4)$$

式中: $v_r(t_m) = r\omega \cos(\omega t_m + \theta)$; $R_P(t_m) = R_{C_r}(t_m) + r \sin(\omega t_m + \theta)$ 。

$\Delta R' = R_P(t_m) - R_{\text{ref}}$, $\alpha_r = \alpha + r\omega \cos(\omega t_m + \theta)$, 是关于慢时间 t_m 的函数。第 3 个指数项为采用 dechirp 处理所特有的剩余视频相位 (RVP)。雷达回波信号与参考信号经过 dechirp 处理后得到差频信号为:

$$s_{if} = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_i}{T_p}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R'\right) \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c} \left(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) \Delta R'\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} (\alpha_r + \beta t_m) t_k\right) \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c} (\alpha_r + \beta t_m) t_k^2\right) \quad (5)$$

将式(5)中的相位除以 2π 并求快时间 t_k 的导数, 得到其距离多普勒频率为:

$$f_r = -2\mu(R_{OC})/c - F \sin(\omega t_m + \Phi) - 2(\alpha + \beta t_m)/\lambda - 4\mu(\alpha_r + \beta t_m) t_k/c \quad (6)$$

式中: $R_{OC} = R_{C_r}(t_m) - R_{\text{ref}}$, $F = \sqrt{A^2 + B^2}$, $A = 2\mu r/c$, $B = 2r\omega/\lambda$, $\Phi = \arctan(B/A) + \theta$ 。由此不难看出, 式(6)中第 1 项表征了旋转中心与参考点之间的径向距离, 其距离与频率的关系与脉冲式 ISAR 相同, 同样是以 $-2\mu/c$ 为系数的正比关系; 第 2 项为旋转点的微多普勒特征项, 可以看出, 在考虑了脉冲持续时间内目标运动对回波信号的影响后, 旋转点的微多普勒仍然呈现正弦曲线的特征。但是与脉冲式雷达微多普勒特征不同, FMCW-ISAR 的微多普勒特征的最大频偏 F 不仅与旋转半径有关, 而且与旋转频率 ω 有关, 相位信息也与旋转频率 ω 有关; 第 3 项和第 4 项为考虑了单次脉冲时间内目标连续运动对回波信号的影响产生的误差因子。第 3 项将导致一维距离像的频率峰值出现偏移, 同时又因为其为慢时间 t_m 的函数, 这将导致一维距离像在整个慢时间-频率平面内出现走动现象。第 4 项是关于快时间 t_k 一次项的函数, 这将导致目标一维距离像出现展宽现象。

因此, 在分析微多普勒特征时, 需要分析出其旋转频率, 以此计算旋转点的真实旋转半径和相位。由式(6)的结论可以得出, 旋转点的真实半径和真实相位表达式分别为:

$$r = cF/2 \sqrt{\omega^2 f_c^2 + \mu^2} \quad (7)$$

$$\theta = \Phi - \arctan(\omega f_c / \mu) \quad (8)$$

2 FMCW - ISAR 微多普勒误差参数估计及补偿

通过上一节的分析,应用 FMCW - ISAR 进行微多普勒特征分析及信息提取,必须消除脉冲持续时间内目标运动产生的多普勒频移的影响。本节在此基础上,根据推导出的误差因子,选取多项相位变换^[12-13]对误差因子进行补偿。

由第 1 节分析已知,式(5)为 FMCW - ISAR 回波信号经差频处理后的结果,将其进一步整理得:

$$s_{if} = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_i}{T_p}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi\Delta R'}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi\mu\Delta R'}{c}\left(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r \omega \cos(\omega t_m + \theta) t_k\right) \exp(-ja_1 t_k) \exp(-ja_2 t_k^2) \quad (9)$$

式中: $a_1 = \frac{4\pi(\alpha + \beta t_m)}{\lambda}$; $a_2 = \frac{4\pi\mu(\alpha_r + \beta t_m)}{c}$ 。因为 $v_y \gg r_{\text{max}} \omega_{\text{max}}$, 对 a_2 做近似为 $a'_2 \approx \frac{4\pi\mu(\alpha + \beta t_m)}{c}$ 。

由式(9)可以看出,最后 2 个指数项的相位是关于快时间 t_k 一次项和二次项的函数,其中相位系数 a_1 和 a_2 是关于慢时间 t_m 的函数。应用多项相位变换可以求得系数 a_2 , 再通过 a_1 和 a_2 的关系计算 a_1 。具体过程如下:

1) 对式(9)做二阶多项相位变换: $P_2[s_{if}, \tau] = \exp(j\omega_2 t_k + \phi_2)$, $\tau \leq t_k \leq T_p$;

2) 对 $P_2[s_{if}, \tau]$ 做关于快时间 t_k 的傅里叶变换,得到峰值位置为 $f_2 = \omega_2/2\pi$, 根据关系 $a_m = \omega_m/m! \tau^{m-1}$

计算 $a_2 = \frac{\pi f_2}{\tau}$;

3) 根据 a_2 与 a_1 的关系计算 a_1 : $a_1 \approx ca_2/\mu\lambda$ 。

前面提到系数 a_2 与 a_1 是关于慢时间 t_m 的函数,因此需对每一个慢时间点的 a_1 和 a_2 进行估计。之后对回波差频信号进行补偿:

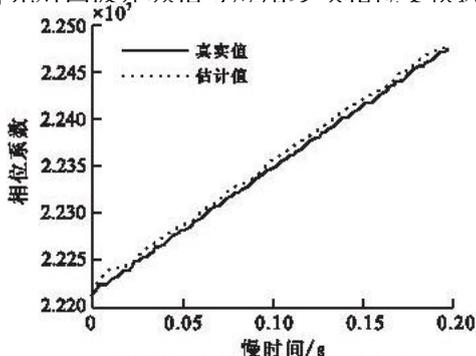
$$s'_{if} = s_{if} \exp(ja_1 t_k) \exp(ja_2 t_k^2) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_i}{T_p}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi\Delta R'}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi\mu}{c}\left(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\Delta R'\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r \omega \cos(\omega t_m + \theta) t_k\right) \quad (10)$$

得到的 s'_{if} 即为补偿后信号,其中第 3 个指数项为上节分析中影响回波信号慢时间—频率图中旋转点的最大频偏的因子,多项相位变换进行参数估计和补偿并未消除此相位项。因此,在回波信号慢时间—频率图中旋转点的最大频偏仍然呈现与旋转频率有关的特征。

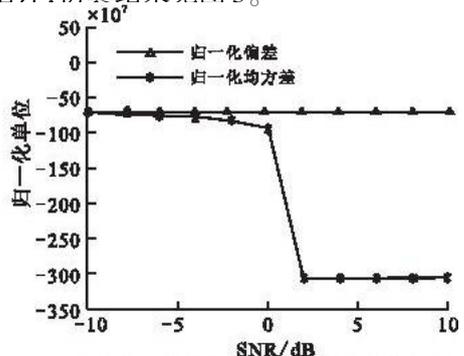
3 仿真实验

仿真采用图 1 所示模型,雷达位于原点 O 处,假设雷达发射 FMCW 信号,载频 $f_c = 10$ GHz,脉冲持续时间 $T_p = 2$ ms,带宽 $B = 500$ MHz。目标主体运动速度为 3 km/s,运动方向与 x 轴正方向的夹角为 45° 。2 个旋转点旋转半径均为 2 m,旋转频率分别为 10π rad/s, 30π rad/s,初始相位分别为 90° 和 0° 。旋转中心在目标坐标系的坐标为 $(-5, 5)$ m,目标中心在本地坐标系的初始坐标为 $(0, 100)$ km。

首先对回波差频信号应用多项相位变换进行误差参数估计。仿真结果见图 3。



(a) 相位系数的估计值与真实值



(b) 归一化偏差与方差信噪比变化曲线

图 3 多项相位变换参数估计

图3(a)为前100次回波相位系数 a_2 的估计值与真实值,可以看出估计值与真实值已相当接近。由于 a_2 为关于慢时间 t_m 的函数,这里以雷达第100次回波为例进行 Monte-Carlo 仿真实验。图3(b)为估计值 a_2 归一化偏差和归一化均方差随差频信号的信噪比变化的曲线,可以看出,在信噪比为-10 dB到10 dB之间,相位系数 a_2 估计的归一化偏差和归一化均方差非常小,表明采用多项相位变换方法能够对其进行有效估计。

采用估计值构造补偿函数对差频信号进行补偿,补偿仿真中加入信噪比为-5 dB的高斯白噪声,仿真结果见图4。

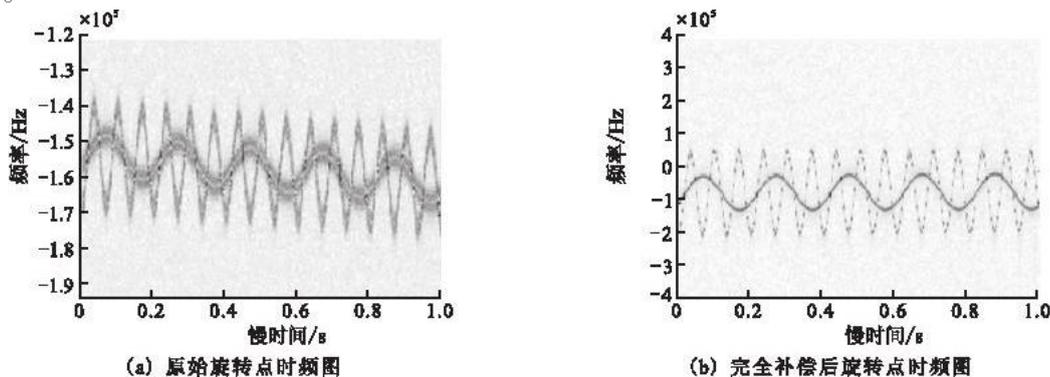


图4 FMCW-ISAR 微多普勒分析及误差补偿

Fig. 4 Analysis of micro-doppler and error estimation in FMCW-ISAR

图4(a)为 FMCW-ISAR 所得原始旋转点的时频图,图4(b)为完全补偿后旋转点的时频图,完全补偿后旋转点时频图的走动、展宽和频率峰值偏移得到了很好的补偿。同时可以看出2个旋转半径相同,旋转频率不同的点在时频图上的最大频偏不同。

应用扩展 Hough 变换对补偿后图4(b)进行微多普勒特征参数提取,检测到的6组参数见表1。

表1 检测到的微多普勒曲线参数

Tab. 1 Parameters of micro-doppler curve detected

参数/单位	1	2	3	4	5	6
f_0/Hz	-8 433	-7 937	-8 433	-8 433	-7 937	-7 440
F/Hz	4.46×10^3	4.96×10^3	1.24×10^4	5.95×10^3	5.46×10^3	5.46×10^3
$\Omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	31.42	31.42	94.25	31.42	31.42	31.42
$\Phi/(\text{°})$	115	116	114	38	115	117

根据表1中检测到的6组数据,计算2个旋转点的真实半径分别为1.96 m和1.91 m。

4 结束语

将 FMCW 技术与 ISAR 技术结合进行研究,可以充分发挥调频连续波雷达低成本、低功耗、高分辨和低截获概率等优势,具有广阔的应用前景。同时,针对目标中的微动部件进行微多普勒效应分析,对于空间目标成像与识别具有重要的意义。本文对 FMCW-ISAR 目标微多普勒特征进行了详细的分析,得出了影响旋转点一维距离像展宽和走动的相位因子,同时得出 FMCW-ISAR 旋转点时频图中最大频偏不仅与旋转半径有关,还与旋转频率有关的结论。针对展宽和走动的现象,应用扩展 Hough 变换给出了基于多项相位变换的 FMCW-ISAR 微多普勒信息提取算法流程。最后的仿真实验验证论文理论推导的正确性,为以后 FMCW 技术应用于 ISAR 微多普勒特征分析的研究提供一定的参考。

参考文献:

- [1] Chen V C, Li F Y, Ho S S, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study [J]. IEEE trans on AES, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] Chen V C. Analysis of radar micro-doppler with time-frequency transform [C]//Proc of the 10th IEEE workshop on statistical signal and array processing. Pocono Manor, PA:IEEE press, 2000: 463-466.
- [3] 李金梁,王雪松,刘阳,等. 雷达目标旋转部件的微 Doppler 效应[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 583-587.
LI Jinliang, WANG Xuesong, LIU Yang, et al. Micro-doppler effect of rotation structure on radar targets [J]. Journal of e-

- electronics & information technology, 2009, 31(3): 583 – 587. (in Chinese)
- [4] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 基于微多普勒分析的弹道导弹目标进动特性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 50 – 52.
GAO Hongwei, XIE Lianggui, WEN Shuliang, et al. Research on precession of ballistic missile warhead based on micro – doppler analys[J]. Systems engineering and electronic, 2008, 30(1): 50 – 52. (in Chinese)
- [5] 梁毅, 郭亮, 邢孟道, 等. 一种斜视 FMCW SAR 的等效正侧视处理方法[J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1159 – 1164.
LIANG Yi, GUO Liang, XING Mengdao, et al. An equivalent side – looking method for squint FMCW SAR[J]. Acta electronica sinica, 2009, 37(6): 1159 – 1164. (in Chinese)
- [6] 江志红, 赵懿, 皇甫堪, 等. 调频连续波 SAR 的研究进展[J]. 现代雷达, 2008, 30(2): 20 – 24.
JIANG Zhihong, ZHAO Yi, HUANGFU Kan, et al. Development of FMCW SAR[J]. Modern radar, 2008, 30(2): 20 – 24. (in Chinese)
- [7] 张大炜, 魏芳, 王岩飞. 多普勒效应对 FMCW – SAR 系统成像性能的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 559 – 563.
ZHANG Dawei, WEI Fang, WANG Yanfei. Analysis of the doppler effect in FMCW – SAR and its influence on the image of the System[J]. Journal of electronics & information technology, 2008, 30(3): 559 – 563. (in Chinese)
- [8] De wit J J M, Meta A, Hooeboom P. Modified range – doppler processing for FM – CW synthetic aperture radar[J]. IEEE geoscience and remote sensing letters, 2006, 3(1): 83 – 87.
- [9] 韩冰, 梁兴东, 丁赤飏. 超高分辨率机载聚束 FMCW SAR 成像方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5861 – 5873.
HAN Bing, LIANG Xingdong, DING Chibiao. Imaging algorithm for ultra – high resolution airborne spotlight FMCW SAR[J]. Journal of system simulation, 2009, 21(18): 5861 – 5873. (in Chinese)
- [11] 董勇伟, 梁兴东, 丁赤飏. 调频连续波 SAR 非线性处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1034 – 1039.
DONG Yongwei, LIANG Xingdong, DING Chibiao. Non – linear signal processing for FMCW SAR[J]. Journal of electronics & information technology, 2010, 32(5): 1034 – 1039. (in Chinese)
- [12] Shimon Peleg, Boaz Porat. Estimation estimation and classification of polynomial – phase signals[J]. IEEE transactions on information theory, 1991, 37(2): 422 – 430.
- [13] 张容权, 杨建宇, 熊金涛. 基于多项相位变换的线性 FMCW 雷达目标加速度和速度估计方法[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 452 – 455.
ZHANG Rongquan, YANG Jianyu, XIONG Jintao. Method for acceleration and velocity estimation of linear FMCW radar's target based on polynomial phase transform[J]. Journal of electronics & information technology, 2005, 33(3): 452 – 455. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

An Extracting Method of Micro – Doppler Features in FMCW – ISAR Based on Polynomial Phase Transform

LIANG Ying¹, TIAN Yun², ZHANG Qun¹, ZHU Xiao – peng¹, HE Jin¹, ZHU Feng¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Unit 95999, Beijing, 100078, China)

Abstract: The micro – Doppler (m – D) features and extracting method based on the FMCW – ISAR is mainly studied in the paper. The target's continuous moving in pulse repetition interval (PRI) will induce the main lobe widening and deviation of the range profile in FMCW – ISAR system. The induced error will influence the processing of the extraction of m – D features and imaging. The accurate micro motion features cannot be obtained by immediately utilizing existing method of extracting m – D features. To solve this problem, the detailed manifestation and characteristics of target's m – D in FMCW – ISAR is analysed firstly. And then, combining with the extended Hough transform, an extracting method of m – D features parameters in FMCW – ISAR based on Polynomial Phase Transform is proposed in the paper. Finally, some results are given for validating the theoretical derivation and the effectiveness of the proposed method

Key words: FMCW – ISAR; m – D features; widening and deviation; polynomial phase transform