

频率步进雷达多目标 ISAR 成像方法

崔应留^{1,2} 罗文茂¹ 王德纯^{1,3}

(1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京, 210094; 2. 南京审计学院工学院, 南京, 211815; 3. 南京电子技术研究所, 南京, 210039)

摘要: 针对频率步进雷达同一波束内多个运动目标在径向上重叠而无法分辨时的 ISAR 成像问题, 提出了一种基于调频傅里叶变换的 ISAR 多目标成像新方法。在构建频率步进雷达多目标回波信号模型的基础上, 采用调频傅里叶变换精确估计各个目标的速度参数, 结合 Clean 方法实现对多目标回波信号的分离, 完成多目标 ISAR 成像。仿真实验结果进一步验证了文章所采用方法的有效性。

关键词: 多目标成像; 频率步进; 调频傅里叶变换; 速度估计

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A

Stepped Frequency ISAR Imaging of Multiple Targets

Cui Yingliu^{1,2}, Luo Wenmao¹, Wang Dechun³

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China; 2. School of Technology, Nanjing Audit University, Nanjing, 211815, China; 3. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, 210039, China)

Abstract: Aiming at the stepped frequency ISAR imaging problems of multiple moving targets in the same antenna beam overlapped over the range, a new method of stepped frequency ISAR imaging of multiple targets is proposed, based on the chirp-Fourier transform (CFT). On the basis of the multi-target echoes model of stepped frequency radar, the velocities of each target can be estimated accurately by the CFT. Then the multiple target echo signals can be separated by combining CFT and clean idea, thus the ISAR imaging is finished. The simulation results also prove the validity of the proposed method.

Key words: imaging of multiple targets; stepped-frequency; chirp-Fourier transform; speed estimation

引 言

多目标成像方法的研究,特别是对编队飞行目标识别或成像方法的研究具有十分重要意义^[1-4]。由于编队飞行的目标间距小,多个目标可能位于同一波束,对于低分辨雷达而言无法在距离或方位上进行分辨。频率步进雷达信号作为高距离分辨信号,在雷达目标识别和成像方面得到广泛应用^[5,6]。另外,逆合成孔径雷达(ISAR)成像技术可以观察到目标的精细结构。基于频率步进信号 ISAR 成像技术为识别多目标提供可能。目前对于基于频率步进信号的 ISAR 研究的主要是对单一目标进行成像,而对

多目标成像的研究比较少。如果多个目标不在同一雷达波束内,或在同一波束但在距离上可分辨,则可用单目标成像方法对多个目标回波进行处理。当多个目标位于同一波束内且在距离上无法分辨时,由于各目标相对于雷达的平动不可能完全相同,则单个目标的运动补偿方法无法同时完成对各个目标的平动补偿,因而不能获得清晰的多目标 ISAR 像。文献[7]基于 Keystone 变换的方法,引入修正离散 Chirp-Fourier 变换,并结合 Clean 技术,提出一种适用于编队目标的 ISAR 成像实现方法。文献[8]提出基于 Radon 变换的方法实现两个目标的 ISAR 成像。文献[9]结合分数阶傅里叶变换和 Clean 的方法对多目标回波信号中各个目标的回波分量进行分离,最后用常规算法对各个目标分别进行成像。文献[10]首先采用 Radon 变换估计目标个数并对目标包络进行粗对齐,然后用传统的包络相关法结合目标隔离和曲线拟合法对目标进行精确的包络对齐,最后通过 DCFT 算法完成相位补偿,获得多个目标清晰的 ISAR 像。

上述多目标成像方法都是基于雷达发射 LFM 信号的情况,且算法较复杂。本文在前人研究的基础上,提出一种频率步进雷达多目标 ISAR 成像新方法,即首先对回波采用调频傅里叶变换^[11],进行各目标回波分离,并精确估计各目标的运动参数实现各个目标的运动补偿,最后完成各个目标的 ISAR 成像。

1 频率步进雷达多目标 ISAR 回波信号模型

图 1 给出雷达与目标 Z_l 之间的二维几何模型, $r_l(t)$ 为雷达至目标几何中心的距离,散射点 A_{il} 在目标坐标系 xoy 中的坐标为 $(x_{A_{il}}, y_{A_{il}})$, $r_{oA_{il}}(t)$ 为散射点 A 至目标旋转中心 o 的距离。只考虑目标存在径向和旋转运动,设 t 时刻目标径向速度为 v_l ,旋转角度为 θ_l ,旋转角速度为 ω_l ,则散射点 A_{il} 至雷达的距离 $R_{A_{il}}(t)$ 可表示为(一般情况下 $r_l(t) \gg r_{oA_{il}}(t)$)

$$R_{A_{il}}(t) \approx r_l(t) + x_{A_{il}} \cos(\omega_l t) - y_{A_{il}} \sin(\omega_l t) \quad (1)$$

设雷达每次发射 M 组频率步进信号,每组包含脉冲数为 N 个,频率步进量为 Δf ,载频起始频率为 f_0 ,子脉冲重复周期为 T_r ,发射脉冲宽度为 τ , c 为电磁波速,则雷达发射频率步进信号可表示为

$$S_i(t) = \text{rect} \left[\frac{t - nT_r - \frac{\tau}{2}}{\tau} \right] \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)t] \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

首先考虑目标 Z_l 在径向上做匀速运动,速度为 v_l ,初始距离为 R_{0l} ,则在 $t_{n,m}$ 时刻散射点 A_{il} 的回波信号与本振信号混频后可表示为

$$S_{rA_{il}} = \sigma_{A_{il}} \exp \left[-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R_{A_{il}}(t_{n,m})}{c} \right] \quad (3)$$

式中: $\sigma_{A_{il}}$ 表示散射强度; $R_{A_{il}} = R_{0l} + v_l t + x_{A_{il}} \cos\omega_l t - y_{A_{il}} \sin\omega_l t$; $t_{n,m}$ 为雷达发射第 m 组($m=1, \dots, M$)、第 n 个子脉冲时刻,故为了得到最大的回波信号幅度,采样时刻取 $t_{n,m} = (m-1)NT_r + nT_r + \frac{\tau}{2} + \frac{2R_{0l}}{c}$ 。

对于多散射点模型目标 Z_l ,其回波表示为各散射点回波叠加,即

$$S_{rZ_l} = \sum_{i=1}^I S_{rA_{il}} = \sum_{i=1}^I \sigma_{A_{il}} \exp \left[-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R_{A_{il}}(t_{n,m})}{c} \right] \quad i=1, \dots, I \quad (4)$$

式中: I 表示 Z_l 散射点的个数; $\sigma_{A_{il}}$ 表示散射点 A_{il} 的散射强度。则存在多个目标的情况下,回波信号模型可表示为

$$S_r(t_{n,m}) = \sum_{l=1}^L S_{rZ_l}(t_{n,m}) = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I S_{rA_{il}} = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sigma_{A_{il}} \exp \left[-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R_{A_{il}}(t_{n,m})}{c} \right] \quad (5)$$

式中: L 表示目标的个数。考虑散射点 A_{il} 的回波相位形式

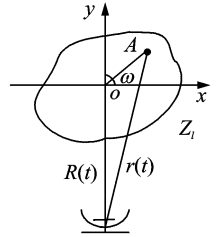


图 1 雷达与目标几何关系
Fig. 1 Geometric relationship of radar and targets

$$\Phi_{A_s} = -2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R_{A_s}(t_{n,m})}{c} \quad (6)$$

由于一般情况下积累时间比较短,为了估计目标径向速度,取某一组脉冲,如取第 1 组脉冲,即 $m=1$,将 R_{A_s} 和 $t_{n,m}$ 代入式(6),经化简和运算可得

$$\Phi_{A_s} = -2\pi(a_{0A_s} + a_{1A_s}n + a_{2A_s}n^2)/c \quad (7)$$

其中

$$a_{0A_s} \approx 2R_{0l}f_0 + 4v_lR_{0l}f_0/c + v_l\tau f_0 + 2x_{A_s}f_0 \quad (8)$$

$$a_{1A_s} \approx 2R_{0l}\Delta f + 2v_lT_r f_0 + v_l\tau\Delta f + 4v_lR_{0l}\Delta f + 2x_{A_s}\Delta f \quad (9)$$

$$a_{2A_s} \approx 2v_lT_r\Delta f \quad (10)$$

将式(7)代入式(4),则目标 Z_l 的回波表示为

$$S_{rZ_l}(n) = \sum_{i=1}^l S_{rA_s} = \sum_{i=1}^l \sigma_{A_s} \exp[-j2\pi(a_{0A_s} + a_{1A_s}n + a_{2A_s}n^2)/c] \quad (11)$$

由于 a_{0A_s} 是常数,故式(11)可以看成是离散的线性调频信号,载频为 $f_{A_s} = a_{1A_s}/c$,调频率为 $\mu_{A_s} = a_{2A_s}/c$,且同一刚体类目标各个散射点的 μ_{A_s} 都一样,即 $\mu_{A_s} = \mu_l$ 。则多目标回波信号模型表示为

$$S_r(n) = \sum_{i=1}^L \sum_{i=1}^l S_{rZ_l} = \sum_{i=1}^L \sum_{i=1}^l \sigma_{A_s} \exp(-j2\pi a_{0A_s}) \exp[-j2\pi(f_{A_s}n + \mu_l n^2)] \quad (12)$$

2 多目标成像方法

2.1 基于调频傅里叶变换的多目标运动参数估计

由于式(12)中 f_{A_s}, μ_l 仅与目标径向速度和距离有关,对于多个目标,即使其距离上无法分辨,但其运动速度往往存在差异,故存在不同的 μ_l 。如果能够精确估计不同目标的 μ_l ,则根据式(10)可以得到不同目标速度的精确估计,在此基础上进行目标分离,并对各个目标分别进行速度补偿,最后完成 ISAR 成像。本文采用调频傅里叶变换的方法估计多目标的径向运动参数和距离参数,为此引入如下变换形式^[12,13]

$$F(f, \mu) = \int S_r(t) \exp[j2\pi(ft + \mu t^2)] dt \quad (13)$$

式(12)代入式(13)得

$$F(f, \mu) = \int \sum_{i=1}^L \sum_{i=1}^l \sigma_{A_s} \exp(-j2\pi a_{0A_s}) \times \exp[-j2\pi[(f_{A_s} - f)t + (\mu_l - \mu)t^2]] dt \quad (14)$$

当 $f_{A_s} = f, \mu_l = \mu$ 时,上式积分信号相参累加,达到极大值;反之,积分时信号存在互相抵消的现象,参数域上对应点的值比较小。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_{A_s}, μ_l) 处出现尖峰,由此可以精确估计频率和调频率的值: $\tilde{f} = f_{A_s}, \tilde{\mu} = \mu_l$,根据式(10),可以得到

目标速度的估计值 $v_l = \frac{\tilde{\mu}}{2T_r\Delta f}$ 。另外不同运动目标其对应的峰值位置不同,根据对应峰值的位置可以估计出不同目标的运动参数。本文首先通过窄带搜索雷达初步估计各目标散射中心距离 R_{0l} 、速度 v_l ,再结合波形参数确定 f_{A_s}, μ_l 的搜索范围进行回波信号的调频傅里叶变换,从而精确估计频率和调频率,完成不同目标的径向速度估计。

2.2 多目标回波分离

根据前一节估计出的目标速度 $v_l, l=1, 2, \dots, L$,用某一估计速度(如第 l 个目标速度 v_l)去补偿多目标回波,则第 l 个目标速度被精确补偿并对其进行 IFFT,得到第 l 个目标的高分辨一维距离像,即在第 l 个目标的各个散射点位置表现为高度集聚的峰值;而其他目标速度由于没有得到完全补偿,能量不能有效累积,距离像存在偏移和展宽,展宽量为^[12] $\Delta B_{\Delta v} = \frac{4(N-1)N}{c} \Delta v \Delta f T_r$,可以采用 Clean 算法进行

多目标分离,主要步骤包括:

(1)根据第 2.1 节估计的第 l 个目标的速度 v_l 值,去补偿式(12),即

$$S'_l(n) = \left(\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l S_{iZ_j} \right) \times \exp \left[j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2v_l t}{c} \right] \quad (15)$$

(2)对式(15)作 IFFT,便可得到一维距离像,且速度得到精确补偿的目标 l ,其一维距离像能够很好聚焦,而其他目标的距离像存在偏移和展宽;

(3)设定合适的门限值 Th ,将距离像峰值能量集中的目标滤出,得到单个目标 l 的距离像,本文选用的较高门限值 $Th = 0.6 | \max(F(k)) |$,其中 $|F(k)|$ 为距离像;

(4)对剩余信号 $F'(k)$ 进行 FFT 处理,并与 $\exp \left[-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2v_l t}{c} \right]$ 相乘,得到除去第 l 目标的其他目标回波信号,然后重复步骤(1~3)得到其他单目标距离像,进而实现多目标的分离。

(5)对各单个目标进行 ISAR 成像。

3 仿真实验

为了验证本文所采用方法对运动参数估计的有效性和实用性,进行计算机仿真实验。

3.1 完全重合的两个点目标速度估计及成距离像

如图 2 两个点目标匀速运动速度的估计,两个速度分别为 $v_1 = 290 \text{ m/s}$, $v_2 = 240 \text{ m/s}$,初始径向距

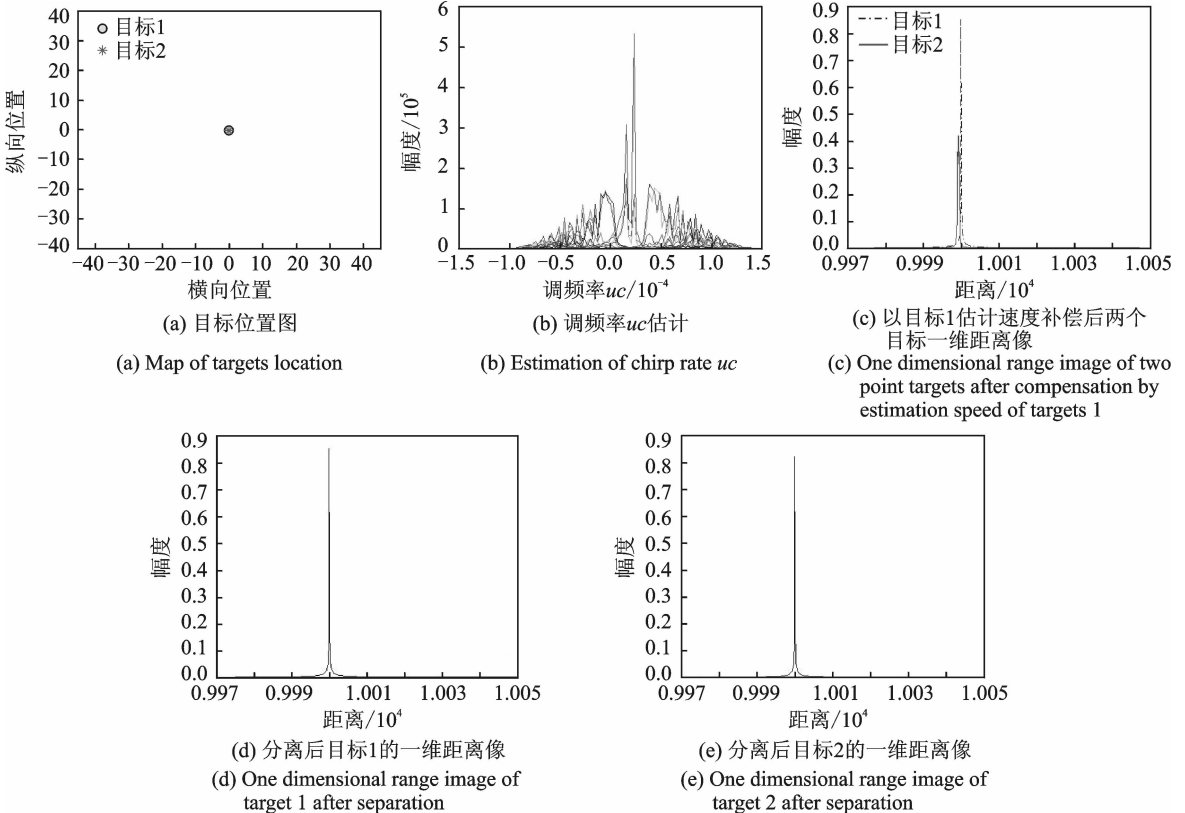


图 2 两个匀速运动点目标速度估计及一维距离像

Fig. 2 Speed estimation and one dimensional range image of two point targets with uniform motion

离为 $R_0 = 10\ 000\ \text{m}$, 波形参数载频为 $f_0 = 3\ \text{GHz}$, 频率步进量 $\Delta f = 2.2\ \text{MHz}$, 脉冲重复周期 $T_r = 1.5\ \mu\text{s}$, 脉冲宽度 $\tau = 0.3\ \mu\text{s}$, 每组脉冲数 $N = 1\ 024$, 脉组数为 $M = 128$, 则理论计算调频率 $\mu = [2.32 \times 10^{-5}, 1.92 \times 10^{-5}]$ 。图 2(a) 表示为两个位置上完全重合的点目标; 图 2(b) 中两个峰值位置表示两个点目标 μ 的精确估计, 其中纵坐标“幅度”表示信号经过调频傅里叶变换的绝对值, 根据 $v = \frac{\mu}{2T_r\Delta f}$ 可以精确估计两个点目标的径向速度 $v_1' = 290\ \text{m/s}$, $v_2' = 240\ \text{m/s}$; 图 2(c) 表示用目标 1 的速度估计值 v_1' 去补偿两个目标的回波信号, 可以看出目标 1 得到精确补偿, 距离像峰值高度集聚, 而目标 2 速度没有全部补偿, 其距离像存在展宽和偏移, 故可以通过 CLEAN 滤波方式将两个目标分离; 图 2(d) 和 (e) 分别表示两个点目标分离后单独所成距离像。

3.2 完全重合的两个多散射点目标速度估计及 ISAR 成像

目标 1 和目标 2 的位置坐标见图 3(a), 两个目标在径向上完全重合, 速度和波形参数与 3.1 节相同。图 3(b) 中两个峰值分别表示两个目标的不同调频率估计, 并根据公式 $v = \frac{\mu}{2T_r\Delta f}$ 得到目标径向速度的精确估计, 然后用目标 1 的速度估计值 v_1' 去补偿回波信号; 其一维距离像见图 3(c), 目标 1 的距离像由于速度得到精确补偿而高度集聚, 而目标 2 由于速度没有完全补偿距离像产生展宽且峰值降低; 图 3(d), (e) 分别给出目标分离后单独 ISAR 成像结果, 即实现多目标成像。

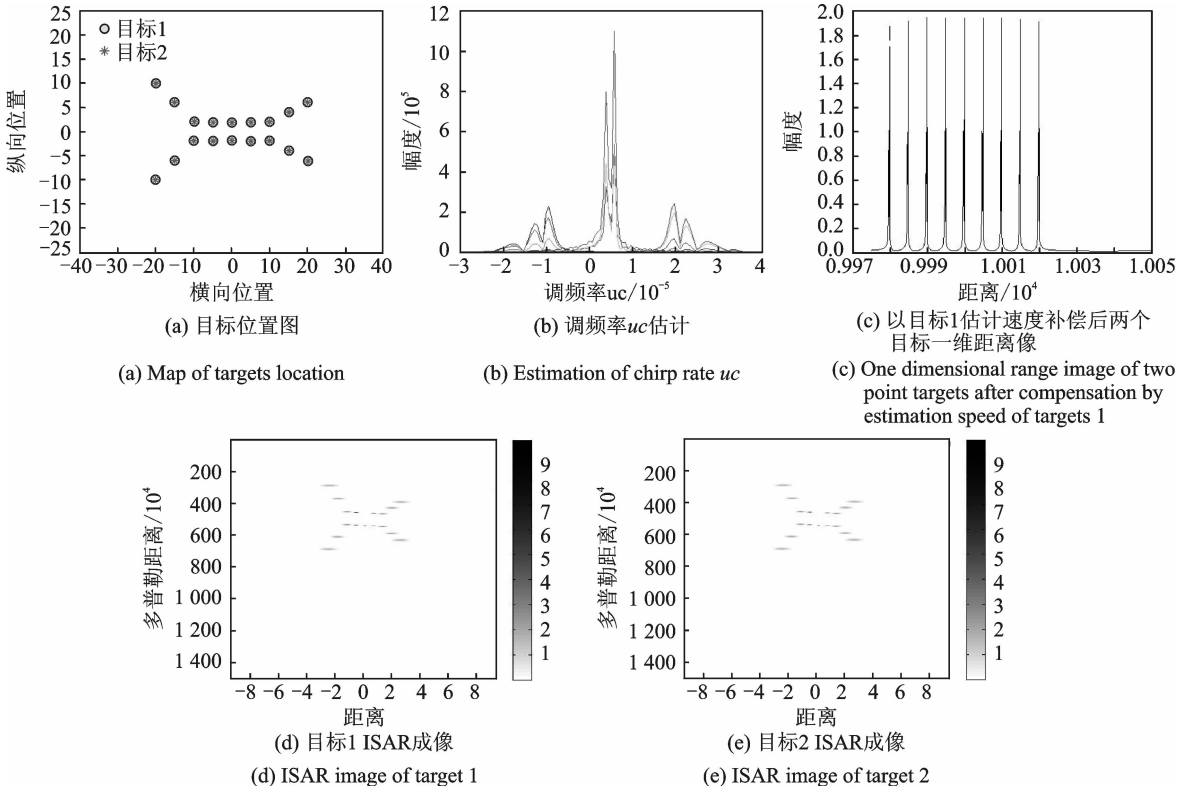


图 3 两个完全重合目标速度估计及 ISAR 成像

Fig. 3 Speed estimation and ISAR image of two complete coincidence targets

4 结束语

本文在分析频率步进雷达多目标回波信号特征的基础上,运用调频傅里叶变换的方法,通过搜索峰值位置,实现多目标径向运动参数的精确估计,接着利用估计的单目标运动速度逐个去补偿多目标回波信号,并结合 Clean 滤波方法,实现多目标分离,最后采用单目标成像的方法完成多目标 ISAR 成像。

参考文献:

- [1] 王洋,陈建文,刘中,等. 多运动目标 ISAR 成像方法研究[J]. 宇航学报,2005,26(4):450-454.
Wang Yang, Chen Jianwen, Liu Zhong, et al. Research on ISAR imaging of multiple moving targets[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 450-454.
- [2] 徐旭宇,吴昊,李小波,等. 基于双 L 阵的双基地 MIMO 雷达多目标角度估计[J]. 数据采集与处理,2013,28(4):436-443.
Xu Xuyu, Wu Hao, Li Xiaobo, et al. Multi-target localization based on double L-shape arrays for bistatic MIMO radar[J]. Journal of Data Acquisition and Process, 2013, 28(4): 436-443.
- [3] Su Junhai, Xing Mengdao, Wang Genyuan, et al. High-speed multi-target detection with narrowband radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2010, 4(4): 595-603.
- [4] 马鹏,张珂,洪振清,等. 基于多目标 CRLB 的分布式相干 MIMO 雷达阵列优化[J]. 数据采集与处理,2012,27(4):410-416.
Ma Peng, Zhang Ke, Hong Zhenqing, et al. Array optimization in distributed coherent MIMO radar based on multi-target Cramer-Rao lower bound[J]. Journal of Data Acquisition and Process, 2012, 27(4): 410-416.
- [5] Lei Wen, Long Teng, Han Yueqiu. Moving targets imaging for stepped frequency radar[R]. IEEE Proceedings of ICSP, 2000:1851-1855.
- [6] 郑纪彬,朱文涛,苏涛等. 一种新的高速多目标快速参数化检测算法[J]. 电子与信息学报,2013,35(2):381-387.
Zheng Jibin, Zhu Wentao, Su Tao, et al. Novel algorithm for fast parametric detection of high-speed multi-target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 381-387.
- [7] 陈文驰. 一种适用于编队目标的 ISAR 成像处理实现方法[J]. 电子学报,2006,34(6):1119-1122.
Chen Wenchi. An implementation method of ISAR imaging for multiple targets information[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2006, 34(6): 1119-1122.
- [8] Shi Jun, Zhang Xiaoling, Huang Shuwei. Multi-target ISAR imaging method[C]//2005 IEEE International Geo-Science and Remote Sensing Symposium. [S. l.]:IEEE Press, 2005.
- [9] 蒋克鹏,陈建文. 一种基于 FrFT 的 ISAR 多目标成像方法[J]. 空军雷达学院学报,2009,23(3):349-352.
Jiang Kepeng, Chen Jianwen. A method of ISAR imaging of multiple targets based on FrFT[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2009, 23(3): 349-352.
- [10] 孔令坤,张伟,张顺生,等. 一种多目标 ISAR 成像方法[J]. 现代雷达,2011,33(1):37-40.
Kong Lingkun, Zhang Wei, Zhang Shunsheng, et al. A method of multi-target ISAR imaging[J]. Modern Radar, 2011, 33(1): 37-40.
- [11] 付耀文,胡杰民,黎湘. 基于调频傅里叶变换的匀加速转动目标 ISAR 成像[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(12):2608-2612.
Fu Yaowen, Hu Jiemin, Li Xiang. ISAR imaging of uniformly accelerative rotating targets based on chirp-Fourier transform[J]. System Engineering and Electronics, 2011, 33(12): 2608-2612.
- [12] Xia XiangGen. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(11): 3122-3133.
- [13] 胡杰民. 复杂运动目标高分辨雷达成像技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
Hu Jiemin. Research on high resolution radar imaging technology for targets with complex motion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.

作者简介:



崔应留(1974-),男,博士研究生,研究方向:雷达成像、信号处理, E-mail: cuiyl@nau.edu.cn.



罗文茂(1975-),男,博士研究生,副教授,研究方向:雷达信号处理, E-mail: luowm@njcit.cn.



王德纯(1944-),男,研究员,博士生导师,研究方向:雷达成像、目标识别, E-mail: gen617@126.com.