

doi: 10.7690/bgzdh.2023.06.011

# 基于改进重建滤波器组的机动目标 MIMO-ISAR 高分辨成像方法

郭永辉, 李云涛, 张宇, 何永华, 李永刚

(航天工程大学, 北京 101416)

**摘要:** 针对空间非均匀采样导致的方位向多普勒模糊问题, 提出改进重建滤波器组的机动目标 MIMO-ISAR 高分辨成像方法。针对目标高机动模型, 构建多载频线性调频信号的 MIMO-ISAR 回波模型, 采用 RWT (radon-wigner transform) 参数估计目标运动参数, 根据方位有效采样率构建滤波器组, 通过实验验证该算法的有效性。结果表明, 该方法能有效解决机动目标方位向多普勒模糊问题。

**关键词:** Wigner-Ville 分布; Radon 变换; MIMO 雷达; 逆合成孔径雷达; 滤波器组

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## High Resolution MIMO-ISAR Imaging of Maneuvering Targets Based on Improved Reconstruction Filter Bank

Guo Yonghui, Li Yuntao, Zhang Yu, He Yonghua, Li Yonggang

(Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of azimuth Doppler ambiguity caused by spatial non-uniform sampling, an improved reconstruction filter bank based MIMO-ISAR high resolution imaging method for maneuvering targets is proposed. For the high maneuvering target model, the MIMO-ISAR echo model of multi-carrier LFM signal is constructed, and the target motion parameters are estimated by RWT (radon-Wigner transform) parameters, and then the filter bank is constructed according to the effective sampling rate of azimuth. The effectiveness of the algorithm is verified by experiments. The results show that the method can effectively solve the problem of azimuth Doppler ambiguity of maneuvering target.

**Keywords:** Wigner-Ville distribution; Radon transform; MIMO radar; ISAR; filter bank

### 0 引言

为更好地解译目标, ISAR 图像的方位向分辨率要与距离向分辨率相当。在对非合作机动目标成像时, 由于目标的速度和加速度都可能变化, 造成横向的非均匀采样问题; 因此, 横向的非均匀采样是 ISAR 横向高分辨面临的问题之一。传统 RD 成像算法中, 雷达发射信号的脉冲重复频率 (pulse repetition frequency, PRF) 预先设定, 而距离多普勒 (range-doppler, RD) 成像算法要求 PRF 与目标速度满足关系  $PRF=2V(t)/(L\cdot\Delta R_l)$ 。当目标在相干积累时间内做高机动运动时, 其速度急剧变化使 PRF 不匹配, 因此成像过程中必然导致多普勒模糊。

当前对 ISAR 多普勒模糊问题的研究并不多, 且多数是基于 SAR 的多普勒解模糊。对于 ISAR 成像中多普勒模糊问题, 有学者提出了估计模糊分量和模糊数的方式消除多普勒模糊<sup>[1]</sup>。此外还有基于多方向多普勒约束解模糊方法, 通过构造空域矢量矩阵消除模糊<sup>[2]</sup>。文献[3]针对群目标 ISAR 成像,

提出了一种基于稀疏分解的多普勒模糊去除方法, 通过求解稀疏驱动优化问题, 在方位时域提取群目标散射中心对应的 chirp 信号, 并在稀疏分解的过程中同时估计每个提取的 chirp 信号的多普勒模糊数。通过对距离单元和时变多普勒进行复杂补偿, 可以很好地重建目标群模糊的 ISAR 图像。文献[4]基于图像域强散射点的参数最优化估计多普勒模糊数, 结合最大对比度准则、CLEAN 技术和循环迭代思想, 同时实现了方位频谱均匀重构和距离徙动校正问题。然而上述方法均通过求解多普勒模糊数的方法实现多普勒解模糊。

笔者在分析多普勒模糊的基础上, 借鉴多通道 SAR 成像中重建滤波器组<sup>[5-6]</sup>的方法对 ISAR 回波进行方位重构。首先采用 RWT 参数估计方法<sup>[7]</sup>估计目标的运动参数, 然后采用重建滤波器组法进行方位重构。通过上述方法, 可以精准实现方位均匀重构, 进而压缩成像, 仿真结果验证了该方法的性能。

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-03-05

作者简介: 郭永辉(1994—), 男, 山西人, 硕士, 从事雷达信号处理、MIMO 雷达成像研究。E-mail: m15735185529@163.com。

## 1 信号模型

设线性阵列 MIMO-ISAR 系统由  $K$  个发射阵元和  $L$  个接收阵元，设雷达发射正交频分的线性调频信号：

$$S_{T(k)}(t, t_m) = \exp(j2\pi f_k t + j\pi k_r t_m^2)。 \quad (1)$$

式中： $t$  为慢时间； $t_m$  为快时间； $f_k$  为不同发射信号的载频； $k_r$  为调频斜率。

当目标做机动运动时，在相干积累时间内目标的运动距离为：

$$r_p(t) = v_0 t + at^2/2 + a't^3/3! + o。 \quad (2)$$

式中： $v_0$  为目标初速度； $a$  为加速度； $a'$  为加加速度； $o$  为速度维关于时间  $t$  的高阶无穷小。

$t$  时刻目标与雷达相位中心的距离为：

$$R(t) = R_0 + r_p(t)。 \quad (3)$$

式中  $R_0$  为初始时刻目标散射中心到雷达的距离，此时回波时延为：

$$t_d = 2R(t)/c = (2R_0 + 2v_0 t + at^2 + 2o)/c。 \quad (4)$$

则原始回波信号为：

$$S_{r(k,l)} = \exp[j2\pi f_k(t - t_d) + j\pi k_r(t - t_d)^2]。 \quad (5)$$

构建参考信号：

$$S_{ref} = \exp[j2\pi f_k(t - t_{ref}) + j\pi k_r(t - t_{ref})^2]。 \quad (6)$$

回波信号与参考信号混频后可得：

$$S_{if(k,l)} = \exp\{j2\pi[(f_k + k_r T_p/2 - k_r t_{ref})t_d + k_r t_d^2/2 + j\Phi]\}。 \quad (7)$$

式中  $\Phi = 2\pi(f_k t_{ref} + k_r t_{ref}^2/2 - k_r T_p t_{ref}/2)$ 。

推导可得机动目标所导致的多普勒频移为：

$$f_d = f_{d0} + mt = 2v_0/\lambda + 2at/\lambda。 \quad (8)$$

式中频率  $f_{d0}$  和调频斜率  $m$  分别体现了机动目标的径向速度和加速度信息，并且由此可得初速度与加速度为：

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}_0 &= f_{d0}\lambda/2 \\ \hat{a} &= m\lambda/2 \end{aligned} \right\}。 \quad (9)$$

$$W_{S_{(k)}}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi[f_k(t+\tau/2)+k_r(t+\tau/2)^2/2]} e^{j2\pi[f_k(t-\tau/2)+k_r(t-\tau/2)^2/2]} e^{-j2\pi\tau f} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi(f_k\tau+k_r\tau^2)} e^{-j2\pi\tau f} = \delta(f - (f_k - k_r t))。 \quad (10)$$

由上式可见，回波信号的 WVD 是关于频率  $f$  的冲激线谱，信号能量都集中在时频线上。

Radon-Wigner 变换<sup>[9]</sup>是对时频直线做 Radon 变换，将 WVD 中的坐标系进行旋转，在新的坐标系上做投影积分，其几何意义如图 1 所示。

Radon-Wigner 变换可表示为：

## 2 方位均匀重构

当目标做机动运动时，ISAR 的空间采样为非均匀采样，若直接对目标进行 RD 成像会降低成像效果，因此需在成像前进行方位重构。笔者采用重建滤波器组的方法对方位向回波均匀化，由于探测目标为机动目标，首先估计目标的运动参数，再进行方位均匀重构。

### 2.1 机动目标运动参数估计

在 MIMO-ISAR 成像中，空域和时域同时采样，既缩短了成像积累时间又减少了阵元的需求，在更短的相干积累时间内，机动目标的高机动运动状态趋向于平稳化；因此，仅需分析其速度与加速度即可，更为高阶的运动量不计入 MIMO 雷达参数估计中。

由于笔者所采用的雷达为集中式 MIMO 雷达，阵元间距远小于目标与雷达阵列之间的距离，在成像积累时间内目标相对于不同阵元的运动速度误差可忽略不计；因此，任意取其中一个通道的回波信号进行运动参数估计，所得结果即为目标在相干积累时间 (coherent processing interval, CPI) 内的运动参数。如式(7)所示，回波表现为 LFM 信号的形式；因此，对于非平稳的信号，采用时频分析方法进行参数估计。RWT 是将 (wigner-villedistribution, WVD) 同 Radon 变换两者相结合的一种参数估计方法。针对笔者所采用的 LFM 信号，回波信号经过 WVD 分析后将在 WVD 时频平面上显示为一条直线，该直线反应了信号的基本信息。然后对直线进行 Radon 变换，从而实现目标参数估计。RWT 结合了非合作机动目标的回波信号在 WVD 时频平面的直线特性以及 Radon 变换在图像处理中的基本原理，将信号域和图像域两相结合，为信号处理提供了一种新的方法。

Wigner-Ville 分布<sup>[8]</sup>是一种能量型时频联合分布的非平稳信号时频分析方法，LFM 回波信号的 WVD 可表示为：

$$\text{RWT}_{S_{T(k)}}(t', w') = R[W_{S_{T(k)}}(t, w)] = \int_{TW} W_{S_{T(k)}}(t, w) = \int_{TW} W_{S_{T(k)}}(t' \cos \alpha - w' \sin \alpha, t' \sin \alpha + w' \cos \alpha) dw'。 \quad (11)$$

上式以  $(t', w')$  为参数表示 RWT 变换，在 WV 时频平面直线的斜率表示为  $S_l$ ，截距表示为  $i_w$ ，二者皆为关于旋转角  $\theta$  的关系式：

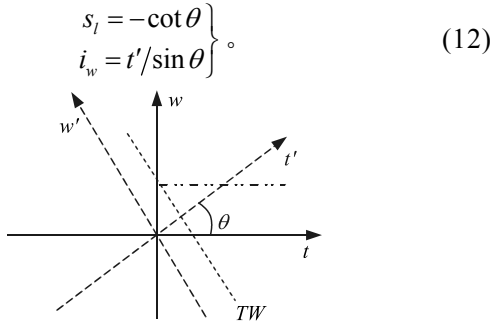


图 1 Radon 变换几何关系

则 RWT 以参数  $(s_l, i_w)$  可表示为:

$$R_{S_{T(k)}}(t', \theta) = \int_{TW} W_x(t', w') dw'' = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{S_{T(k)}}(t, w) \delta(t' - t'') dt'' dw'' = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{S_{T(k)}}(t, w) \delta[\sin \theta (w - i_w - s_l t)] dw dt = \frac{1}{|\sin \theta|} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{S_{T(k)}}(t, w) \delta[w - (w_0 - mt)] dw dt = \frac{1}{|\sin \theta|} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{S_{T(k)}}(t, i_w + s_l t) dt \quad \left. \begin{array}{l} s_l = -\cot \theta \\ i_w = u/\sin \theta \end{array} \right\} \quad (13)$$

式中, RWT 在  $(s_l, i_w)$  时取得最大值, 从而可估计出目标径向运动状态。单通道机动目标回波信号近似为 LFM 信号, 信号的初始频率和调频率体现了机动目标的径向初速度和加速度。

同时为得到更为精确的估计值, 采用分集逼近的方法进行估计。首先 Radon 变换的旋转角为  $1^\circ \sim 180^\circ$ , 得到粗略的估计值后, 再以该粗估计值选定小范围转角, 同时减小角度步长, 再次对 WV 时频面做 Radon 变换得到更精确的估计值。

通过 RWT 估计得到机动目标径向速度和加速度后, 采用重建滤波器组法即可实现方位均匀重构。

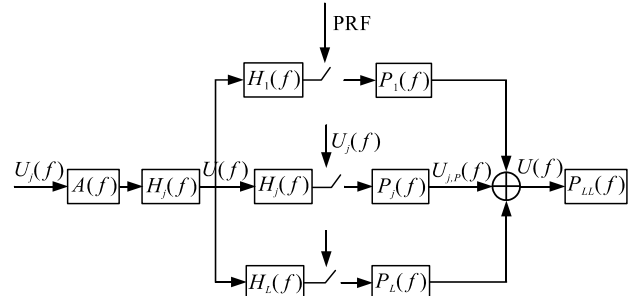
### 2.2 重建滤波器组法方位均匀重构

MIMO 雷达的多个接收阵元分别以 Nyquist 采样率对回波信号进行独立采样, 经过方位重构之后的无模糊谱的采样率为  $L$  倍的 Nyquist 采样率。同时, 在每一采样时刻内, 采样率满足采样定理的要求, 与目标机动运动无关, 因此可由  $L$  个线性系统响应函数实现多普勒解模糊。方位均匀重构流程如图 2 所示。

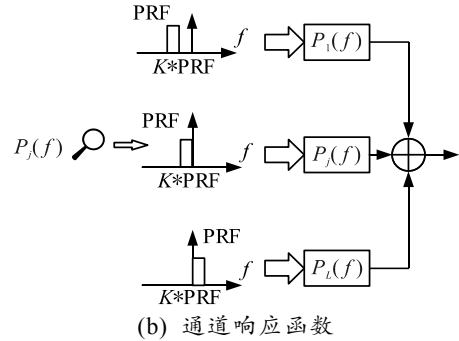
下图中:  $U(f)$  等效独立接收阵元的回波信号;  $H_j(f)$  表示发射阵元对应每一接收阵元的响应, 从而

$$P(f) = H^{-1}(f) = \begin{bmatrix} P_{11}(f) & P_{12}(f + \text{PRF}) & \cdots & P_{1L}(f + (L-1)\text{PRF}) \\ P_{21}(f) & P_{22}(f + \text{PRF}) & \cdots & P_{2L}(f + (L-1)\text{PRF}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{L1}(f) & P_{L2}(f + \text{PRF}) & \cdots & P_{LL}(f + (L-1)\text{PRF}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

可以得到多通道的物模糊 ISAR 信号。



(a) 数据重建流程



(b) 通道响应函数

图 2 ISAR 数据重建流程

在方位向采用中, 每个接收阵元的采样频率均为 PRF, 则重构后的方位信号可等效为  $L$  倍 PRF 采样, 构建单通道响应函数:

$$H_l(f) = \exp\{-j\pi[\Delta x_l^2/2\lambda R_0 + \Delta x_l f/(\hat{v}_0 + \hat{a}t)]\} \quad (14)$$

式中:  $\Delta x_l$  为经带宽合成后发射阵元中心与各接收阵元的距离;  $v_0$  和  $a$  为本小节前一部分经 RWT 所估计的目标速度和加速度值。以该响应函数构建系统响应函数:

$$H(f) = \begin{bmatrix} H_1(f) & \cdots & H_L(f) \\ H_1(f + \text{PRF}) & \cdots & H_L(f + \text{PRF}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(f + (N-1)\text{PRF}) & \cdots & H_L(f + (N-1)\text{PRF}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

对响应函数  $H(f)$  求逆即可得到中心频率为  $f_{0,l} = (-L/2 + l - 1/2)\text{PRF}$  滤波器  $P(f)$ , 对应接收阵元的频率间隔为:

$$I_l = f_{0,l} \pm \frac{\text{PRF}}{2} = \left[ \left( -\frac{L}{2} + l - 1 \right) \text{PRF}, \left( -\frac{L}{2} + l \right) \text{PRF} \right] \quad (16)$$

整合所有接收阵元的对应滤波器即可得到滤波器组:

机动目标多普勒解模糊的基本流程如图 3 所示。

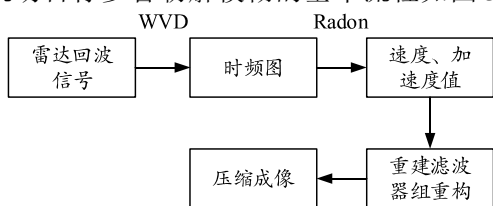


图 3 多普勒解模糊

### 3 仿真结果

设置 MIMO 雷达发射阵元数为 3，接收阵元数为 3。采用调频步进信号作为发射信号，信号带宽均为 400 MHz，脉冲数为 512，脉冲重复频率为 100 Hz，脉宽为 25.6  $\mu\text{s}$ ，信号中心频率为 5.5 GHz，单点目标初始距离为 7 000 m，初速度为 200 m/s，加速度为 20  $\text{m/s}^2$ 。

对回波信号进行 WV 变换可得如图 4 所示时频图。

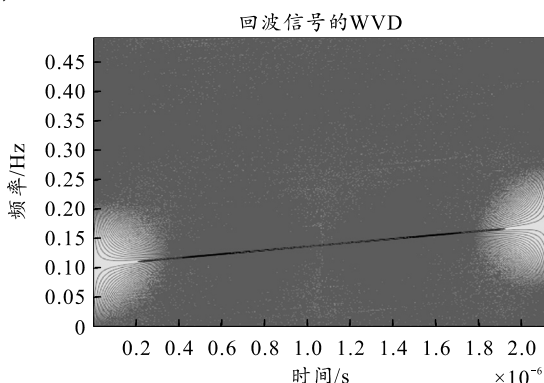


图 4 Radon 变换几何关系

从上图可以看出，机动目标回波信号的 WV 分布是一条聚集性很强的直线，对 WV 分布平面直线做 Radon 变换可得 RWT 图。首先进行粗估计，选取角度范围( $0^\circ \sim 180^\circ$ )，以  $1^\circ$  步进，做 Radon 变换可得结果如图 5 所示， $\theta$  在  $96.83^\circ$  时取得峰值。

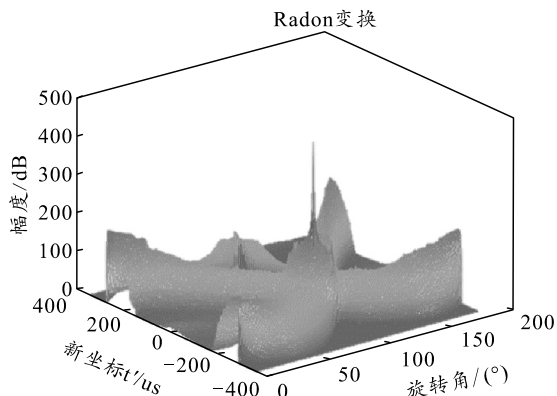


图 5 RWT 粗估计

令角度搜索区间为( $94^\circ \sim 100^\circ$ )，以  $0.1^\circ$  步进，

做 Radon 变换可得结果如图 6 所示，Radon 变换， $\theta$  在  $99.10^\circ$  时取得峰值，对应峰值的新坐标  $t'$  的阈值。

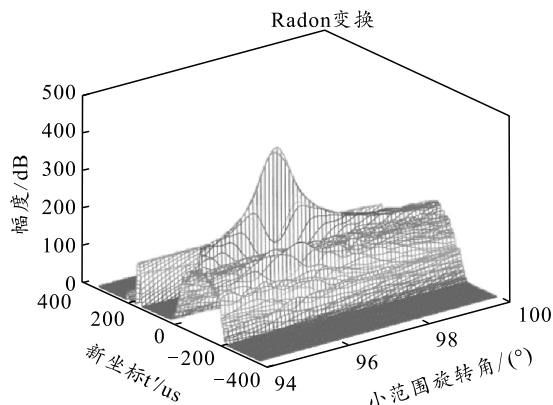


图 6 RWT 精估计

根据式(12)计算得到机动目标运动参数：

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}_0 &= 39.84 \\ a &= 20.33 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将目标速度和加速度的估计值代入式(14)，采用重建滤波器组法解多普勒模糊，成像结果如图 7、8 所示。

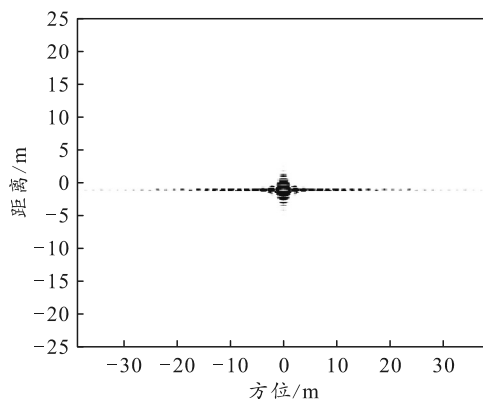


图 7 等效相位中心方位重建 MIMO-ISAR 成像

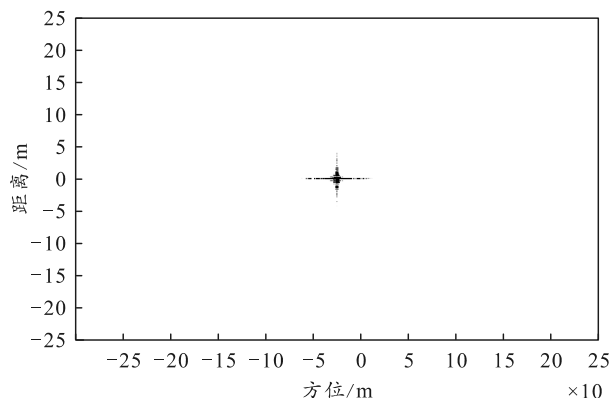


图 8 本文中算法方位重建 MIMO-ISAR 成像

从上图可以看出：本文中算法在方位向展宽要小于等效相位中心 (equivalent phase center, EPC) 法，本文中算法的成像性能要优于 EPC 方法。

由图 9 和表 1 可知, 经过本文中算法方位重构后成像的方位向分辨率要优于 EPC 方位重构成像, 同时旁瓣更低。

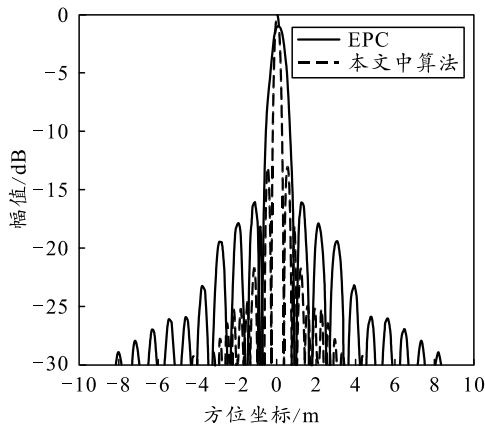


图 9 分辨率分析

表 1 分辨率和时间对比分析

方法	分辨率/m	处理时间/s
EPC	1.55	3.949
本文中算法	0.76	10.221

### 4 结束语

笔者结合 RWT 参数估计理论和重建滤波器组法实现了方位非均匀频谱重构, 仿真实验结果验证了算法的有效性。通过本文中算法, 在方位成像中消除目标机动引起的方位多普勒模糊问题, 提高了方位成像分辨率, 更适用于实际应用。

虽然本文中算法在成像分辨率上较 EPC 算法有所提升, 但在处理时间上要高于 EPC 重构算法; 因此, 如何同时兼顾分辨率和处理时间是进一步研

\*\*\*\*\*

(上接第 37 页)

### 6 结束语

笔者结合卫星电缆产品高效规范化工艺设计需求, 进行模型与知识驱动的航天电缆组件加工工艺快速设计技术分析, 构建相应软件系统并实现在卫星电缆组件加工过程的全型号应用, 以电缆 MBD 3 维数模为源头, 实现了结构化设计信息提取、基于规则的工艺方法自动判别、电缆加工流程自动重构与工艺内容自动生成, 有效提高了电缆加工工艺设计效率, 提升文件规范性和工艺设计模式的知识化、智能化升级, 为型号高强密度研制背景下电缆产品高质、高效研制与配套提供支撑。

### 参考文献:

[1] 石琪, 王棣宇, 傅宇航. 航天电缆组件数字化制造生产

究的方向。

### 参考文献:

[1] 李健, 孙光才, 左绍山. 基于多普勒谱估计的多通道 SAR 盲重构方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(10): 2203-2208.

[2] 郭子越. 多通道 SAR 高分辨率宽测绘带成像及地面活动目标指示技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

[3] HUANG D, LEI Z, XING M, et al. Doppler ambiguity removal and ISAR imaging of group targets with sparse decomposition[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2017, 10(9): 1711-1719.

[4] 刘丰恺, 冯存前, 黄大荣. 高速机动目标多普勒解模糊高分辨成像方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(1): 150-158.

[5] KRIEGER G, CASSOLA M R, YOUNIS M, et al. Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR[C]//Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2005.

[6] 李云涛, 陈永光, 邓云凯. 方位多通道合成孔径雷达数据重建方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 628-632.

[7] WANG D, TANG H. Mixed LFM signal estimation based on radon-wignertransform and matching pursuit[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1607: 012051.

[8] XIN H C, LI B Z. On a new Wigner-ville distribution associated with linear canonical transform[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2021(1): 1-17.

[9] SUN D, LU M, MEI J, et al. Generalized radon transform approach to target motion parameter estimation using a stationary underwater vector hydrophone[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 150(2): 952-968.

\*\*\*\*\*

线构建研究[J]. 电子工业专用设备, 2019(8): 1-4.

[2] 薛静, 陈静, 李瑛, 等. 航天电缆生产组织模式研究[J]. 航天制造技术, 2015(6): 11-14.

[3] 孟倩, 刘检华, 唐承统, 等. 基于流程的复杂产品结构化装配工艺设计技术研究与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 301-312.

[4] 樊红丽, 卢继平, 郑炼. 装配工艺知识建模研究[J]. 航天制造技术, 2012(4): 14-17.

[5] 邢帅, 刘伟强, 熊涛. 典型装配工艺模块化的应用研究[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(6): 615-619.

[6] 北京无线电测量研究所. 一种电缆组件结构化工艺设计方法和系统、存储介质: CN108875229A[P]. 2018-11-23.

[7] 邢香园, 万峰, 陈小第, 等. 航天器智能装配工艺设计系统[J]. 西北工业大学学报, 2018(S1): 104-109.