

基于时频重排的多旋翼无人机微动参数估计

范克强¹ 曹朋¹ 王江岩¹ 倪雪¹

FAN Keqiang CAO Peng WANG Jiangyan NI Xue

摘要

利用微多普勒特征估计多旋翼无人机的微动特征参数对于无人机检测和识别具有重要意义。针对多旋翼无人机微动特征表示难、参数估计误差大的问题,文章提出了一种基于时频重排的微动参数估计方法。首先,建立无人机雷达回波模型,并对回波数据进行时频重排,获得高分辨率的无人机时频特征表示;其次,基于时频图提取时间闪烁频率和最大多普勒频率;最后,进一步估算得到无人机旋翼转速和叶片长度。仿真结果表明:采用高分辨率的时频重排方法时频能量更加集中,微动参数估计误差在5%以内,为无人机检测和识别提供重要依据。

关键词

多旋翼无人机;时频重排;微动参数;参数估计

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.08.036

0 引言

无人机因具有灵活、便携、价格低等优点得到了极大的应用^[1],给军事发展带来新的机遇。新机遇必然伴随新挑战,多旋翼无人机改变了传统的作战形态,例如,多旋翼无人机可以执行侦察、电子对抗、信息中继、射击、细菌污染等行动^[2],对军事安全造成严重威胁。因此,在战场环境下识别旋翼无人机类型意义重大。为了能识别无人机的类别,学者提出了多种方法。其中,光学图像判别是一种有效手段,但其受环境和天气限制比较大。学者提出了一种可靠的手段——雷达探测,旋翼无人机具有飞行高度低、飞行速度慢、体积小等特点,使得雷达散射截面积小,接收回波信号微弱,目标回波难以积累,微多普勒特征不明显,无人机类型的判别难度比较大^[3]。

旋翼无人机具有一个及以上数目的螺旋桨,其旋转叶片会对雷达的后向散射信号产生周期性的频率调制,在无人机自身多普勒谱的两边产生边带,这种附加的多普勒频率调制被称为微多普勒效应^[4]。使用时间与频率联合分析的方法提取其细微动作特征,估计微动参数,可分辨多旋翼无人机类型。

估计目标的微动参数,选用合适的时频分析方法分析目标的时频域信息是比较直接的研究思路。最常见的时频分析方法——短时傅里叶变换(short time fourier Transform, STFT)的优点是能够减小交叉项的干扰对微动特征提取的影响,但存在不能同时兼顾频率分辨率和时间分辨率的问题^[5]。Wigner-Ville分布(wigner-ville

distribution, WVD)相较于STFT方法其时频分辨率有了较好的平衡,但是又无法克服交叉项干扰对时频分析结果的影响^[6]。在WVD基础上,学者提出平滑伪Wigner-Ville分布(smoothed pseudo wigner-ville distribution, SPWVD)^[7]进行时频分析,其时频分辨率较STFT有所下降,但是可以抑制交叉项干扰,其不足之处是计算量较大,不符合瞬息万变的实际情况。为此一些学者对传统时频分析方法做了改进,如沿着频率方向重排的同步挤压变换(frequency-reassigned synchrosqueezing transform, FSST)和同步提取变换(synchroextracting transform, SET)以及沿着时间方向重排的时间重排同步挤压变换(time-reassigned synchrosqueezing transform, TSST)和时间提取变换(transientextracting transform, TET)^[8],上述4种后处理方法允许信号重建,但只提高了时间或者频率某一维度的分辨率,不能同时兼顾时间和频率分辨率。文献[9]提出了一种基于传统时频分析方法的后处理算法——时频重排法(reassignment method, RM),通过重新分配时频平面上每个点的能量到更接近其真实瞬时频率和群延迟的位置,能够有效抑制信号成分间的相互干扰,显著提升时频特征的解析锐度。经此处理后的时频表征呈现两大改进优势:一是运动轨迹的可辨识度显著增强;二是能量分布形态呈现高度聚焦特性,为后续参数解算提供更可靠的依据。

本文引入时频重排法用于表征多旋翼无人机的微动时频特征,改善传统时频分析方法分辨率不高进而影响后续参数估计的精度。利用RM算法对雷达回波数据进行时频分析,然后,基于高分辨的时频图提取时间闪烁频率和最大多普勒频率两个重要的微动特征,再进一步估算得到无人机旋翼转速和叶片长度,有效提高了参数估计的精度。

1. 陆军工程大学通信工程学院 江苏南京 210007

1 基于时频重排的多旋翼无人机时频分析

由于无人机飞行高度低、飞行速度慢，目标的雷达回波藏匿于强杂波或噪声背景中，这一特点对于分析多旋翼无人机的微动特征特别不利。飞行状态下，旋翼转速差异与叶片初始角度随机分布的共同作用，导致时频分析结果中不同运动特征在时间轴上产生混叠现象，造成关键参数辨识度降低。因此在时频分析中要提高时频分辨率并减小交叉项的干扰十分重要。为了研究估计方法可行性，本文研究的对象是悬停状态多旋翼无人机，即旋翼的叶片转速是相同的，但是由于无人机要在空中要保持相对稳定的飞行，其每个旋翼都要提供升力，旋翼旋转的特点是相邻旋翼旋转方向相反，对角旋翼旋转方向相同。为了分析旋翼无人机高分辨率精细化微动特征，研究高分辨率时频分析方法对提取旋翼无人机微动特征的有效性，探索通过提取时频谱能量信息，有效估计微动参数。仿真雷达参数及无人机相关参数如表 1~2 所示。

表 1 仿真雷达参数

参数	数值
工作频率	5 GHz
观测周期	100 ms
采样频率	10 kHz
方位角	45°
俯仰角	10°

表 2 无人机主要技术参数

无人机类型	旋翼个数	旋翼转速 / (r·s ⁻¹)	叶片长度 /cm
大疆域 2	4	32.5	11
大疆悟 2	4	25.0	19
大疆 M350	4	29.0	11
大疆 M600	6	27.0	12

多旋翼无人机微动参数估计实现框图如图 1 所示，在获取多旋翼无人机雷达回波数据后，首先进行 RM 时频分析获得较高时频分辨率谱图，然后对谱图分别从时间维和时频维提取叶片闪烁频率和最大多普勒频率等微动特征，最后估计多旋翼无人机转速和叶片长度等微动参数。

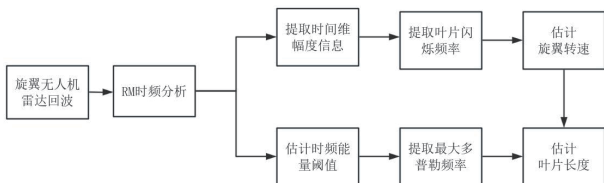


图 1 多旋翼无人机微动参数估计实现框图

1.1 多旋翼无人机回波建模

对于多旋翼的无人机，假设各旋翼叶片的雷达散射截面（radar cross section, RCS）相同且均为 1，在单个旋翼回波模型基础上^[10]，本文构建多旋翼无人机雷达回波积分模型用

公式表示为：

$$s_z(t) = \sum_{m=1}^M L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_{om} + Z_{om} \sin \beta_m + vt \sin \alpha_m \cos \beta_m \right] \right\} \cdot \quad (1)$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} \sin c \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \frac{L_2 + L_1}{2} \cos \beta_m \cos \left(\omega_m t + \varphi_{om} + \frac{k2\pi}{N} - \alpha_m \right) \right\} \cdot \exp \{ -j \varphi_{m,k}(t) \}$$

$$\varphi_{m,k}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{L_2 + L_1}{2} \cos \beta_m \cos \left(\omega_m t + \varphi_{om} + \frac{k2\pi}{N} - \alpha_m \right) \quad (2)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1; m = 1, 2, \dots, M)$$

式中： M 表示旋翼组总数； N 表示每个旋翼所装配的桨叶总数； L_1 表示叶片基座与旋翼轴心之间的径向距离； L_2 表示翼尖末端相对旋翼中心的最大旋转半径， $L = L_2 - L_1$ 两者差值即为旋转翼片的有效展长；对于第 m 组旋翼， R_{om} 表示雷达传感器至该旋翼旋转轴心的直线测距； Z_{om} 表示该旋翼组桨叶平面的安装高度； β_m 表示雷达波束轴线与第 m 号旋翼中心连线形成的俯仰夹角； ω_m 表示量化该旋翼组的旋转角速度特性； φ_{om} 表示第 m 个旋翼的初始相位角； v 表示旋翼无人机的平动速度； λ 表示雷达发射波波长。

1.2 多旋翼无人机时频重排分析

为了解决多旋翼无人机时频表征交叉项干扰和时频分辨率低的问题，通过动态迁移时频能量分布的重心定位策略，将原始时频平面中的能量单元向信号特征的核心区域汇聚，即可利用 RM 方法分析其微动特征。对于信号 $s(t)$ ，RM 的定义为：

$$RM(u, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |V(t, \omega)|^2 \delta(u - t_x(t, \omega)) \delta(\xi - \omega_x(t, x)) dt d\omega \quad (3)$$

式中： $V(t, \omega)$ 表示传统时频分析方法 STFT； $\delta(\cdot)$ 表示狄拉克函数； $t_x(t, \omega)$ 和 $\omega_x(t, x)$ 分别表示瞬时频率算子和群延迟算子，定义为：

$$t_x(t, \omega) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi MV_{t,\omega}(u, \xi) du d\xi}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} MV_{t,\omega}(u, \xi) du d\xi} \quad (4)$$

$$\omega_x(t, \omega) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u MV_{t,\omega}(u, \xi) du d\xi}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} MV_{t,\omega}(u, \xi) du d\xi} \quad (5)$$

式中： $MV_{t,\omega}(u, \xi) = \frac{1}{2\pi} s(u) g(t-u) \hat{s}(\xi) \hat{g}(\xi-\omega) e^{-j\omega(u-t)} e^{-j\xi t}$ 为时频位置附近的概率分布函数。

在旋翼无人机微动特征时频分析领域，微多普勒效应表征的解析精度受制于旋转角速度、初始相位角等动力学参数的耦合作用。基于此，实现高保真的时频分布精度成为微动特征解译的关键技术指标。传统时频分析方法采用固定窗函数设计，虽能有效衰减交叉干扰成分，但受制于窗口时宽一带宽积的物理约束，导致时频能量弥散现象显著。相比之下，重排谱方法通过引入自适应重分配机制，将时频平面内的能量单元重新映射至信号瞬时频率轨迹的邻域空间，在实现交叉项非线性抑制的同时显著增强了时频分布的拓扑紧致性。

2 多旋翼无人机微动参数估计

经 RM 时频分析后的无人机时频特征图中，时频分布能够清晰显示旋翼叶片转动引发的周期性信号变化。要准确估计不同型号无人机的微动参数，关键在于从这些时频特征中提取闪烁频率、最大多普勒频率等微动特征。本文从高分辨率时频谱的闪烁特性和能量特征信息提取旋翼目标微动特征，估计微动参数。

2.1 旋翼转速估计

旋翼目标回波在“闪烁”时刻频率为矩形频带，被称作旋翼叶片回波在时频域的“闪烁效应”，与时域“闪烁”具有一致性^[11]。因此提取时频域中一维时间幅度信息，可有效还原时域闪烁时刻。闪烁频率的提取关系旋翼转速估计，基本思路是将回波信号时频矩阵的零频率分量移动到频谱的中心，然后提取频谱中心一维时间信息，最后从时间幅度图获取周期时间内的闪烁频率，具体计算步骤如下：

步骤 1：计算信号 x 的归一化自相关函数 $R(\tau)$ ，找到自相关函数 $R(\tau)$ 的最大值和次大值，最大值通常出现在 $\tau=0$ ，次大值出现在 $\tau=\tau_{\text{sec}}$ ，其公式为：

$$R(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot x(n+\tau)}{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2} \quad (6)$$

式中： N 是信号长度； τ 是延迟。

步骤 2：提取闪烁频率 f_{flash} ：

$$f_{\text{flash}} = \frac{F_s}{|\tau_{\text{sec}}|} \quad (7)$$

式中： F_s 是采样频率。

步骤 3：估计旋翼转速 f_{rot} ^[12]：

$$f_{\text{flash}} = kNf_{\text{rot}} \quad (8)$$

式中： N 为单个旋翼的叶片数，当 N 为奇数时 k 取 2， N 为偶数时 k 取 1，本文所涉及无人机的单个旋翼叶片数均为 2 片。

2.2 叶片长度估计

首先，提取最大微多普勒谱宽 Δf ；然后，计算最大多普勒频率值 f_{dmax} ；最后，结合提取闪烁频率估计叶片长度 L ，具体公式为：

$$f_{\text{dmax}} = \frac{1}{2} \gamma \cdot \Delta f \quad (9)$$

$$L = \frac{\lambda f_{\text{dmax}}}{4\omega_m \cos \beta} \quad (10)$$

式中： $\omega_m = 2\pi \times f_{\text{rot}}$ ； γ 为阈值通常取 0.7~0.8。

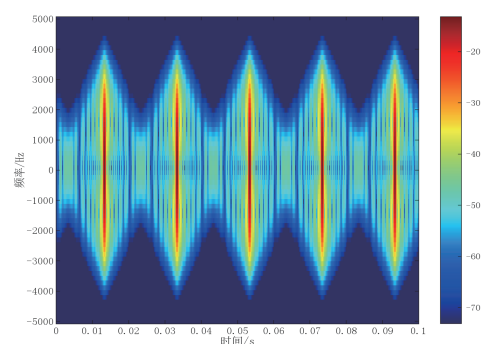
3 实验结果与分析

3.1 时频分析方法性能比较

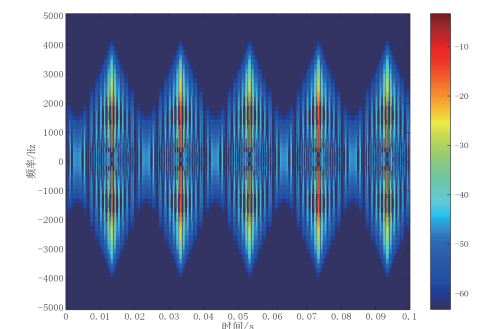
在旋翼目标雷达回波建模仿真框架中，叶片结构可解构为离散散射源集合的线性合成模型，而无人机机体则因其显

著的高 RCS 特性简化为点散射源近似。本研究基于 RM 方法构建了多类型旋翼无人机的微多普勒特征解析体系，并与短 STFT 和 TSST 进行时频分析性能比对。仿真设定采用典型观测几何构型：目标斜距 1 000 m，方位 45°，俯仰 10°，雷达采样率 10 kHz，多旋翼相位参数服从均匀分布，设置信噪比为 20 dB。

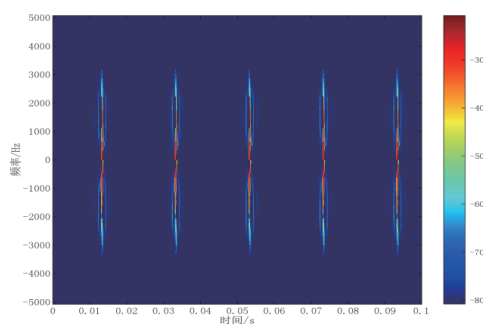
无人机构型差异性导致其微多普勒特征呈现显著分异：如图 2 单旋翼无人机所示，受机体散射耦合效应影响，其周期性叶尖闪烁现象呈现单一调制周期特征；而图 3 四旋翼无人机因各旋翼初始相位角的异步性分布，导致闪烁事件在时间域产生非相干叠加，形成时频图像的交叠。值得注意的是，此类相位随机性虽引发周期特征变异，但微多普勒带宽参数保持恒定。为实现时频联合分辨率优化，本实验统一采用高斯窗函数（窗长 64 点，16 点重叠步进）构建滑动窗，该参数设置在时频平面能量聚集性与瞬态特征追踪能力间达成有效平衡。



(a) STFT 方法



(b) TSST 方法



(c) RM 方法

图 2 单旋翼无人机微多普勒特征

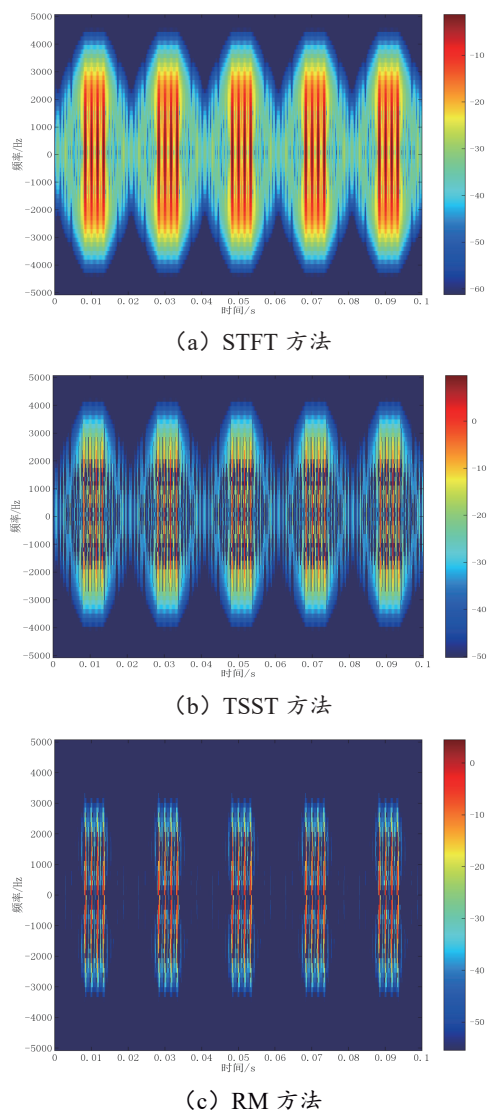


图3 四旋翼无人机微多普勒特征分析

STFT 方法受固定窗函数的物理性制约，其时间精度和频率精度难以同时兼顾，不能同时看清楚信号的时间和频率细节。TSST 方法改善了交叉项的干扰，闪烁特性较 STFT 更明显，但频率分辨率改善不明显。RM 方法闪烁特性最明显，频率分辨率明显提高，在抑制了干扰项影响的同时，兼顾了时频分辨率。表 3 展示了具体的评价。

表 3 对时频分析方法的评价

方法	评价
STFT	能够识别旋翼无人机闪烁特性，时频分辨率最低。
TSST	改善交叉项干扰，时域闪烁更明显，频率分辨率改善不明显。
RM	抑制干扰项影响，时频分辨率最高。

为了直观表示 RM 方法明显提高时频分辨率，采用 Renyi 熵，量化表示。Renyi 熵越大表示矩阵的特征值分布越均匀，表示时频分辨率越低；相反，Renyi 熵越小表示矩阵的特征值分布越集中，表示时频分辨率越高。Renyi 熵的计

算公式为^[13]：

$$R=\frac{\log_2\left(S_{tt}^{\alpha}d(t,f)+\varepsilon\right)}{1-\alpha}$$

(11)

时频能量分布矩阵 S_{tt}^{α} 作为基元，Renyi 信息熵的敏感度由调控因子 α （实验取值为 3）调节，同时引入微量修正系数 ε 确保数值稳定性。图 4 展示了不同类型多旋翼无人机的 Renyi 熵分布特征，揭示了目标分类的信息度量差异。STFT 方法的 Renyi 熵值介于 9~10，TSST 时频分析的熵值介于 8~9，RM 方法的 Renyi 熵值最小，介于 6~8，代表 RM 方法具有更高的时频分辨率和能量聚集性。传统时频分析方法在处理旋翼目标时，其生成的周期性特征谱带存在显著的能量弥散现象，表现为特征频率在时频平面占据多个采样单元，造成参数解算误差的累积效应。本研究采用 RM 方法，该方法通过动态压缩特征谱带的能量分布范围，有效抑制频谱扩散干扰，从而显著提升微动特征提取准确度。

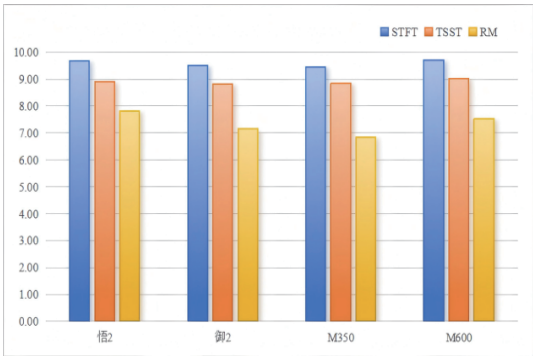


图 4 不同时频方法的 Renyi 熵值

3.2 悬停状态微动参数估计

验证多旋翼无人机悬停状态微动参数估计值。在理想悬停状态下，多旋翼无人机的旋翼转速是相同的。这是为了确保升力平衡和力矩平衡，从而实现稳定的悬停。雷达参数和旋翼无人机参数不变（表 1~2 所示），悬停状态下各旋翼转速相同，表 4 给出不同旋翼无人机 STFT、TSST、RM 的微动参数估计结果。

实验对比发现，当四旋翼无人机静止在空中时，使用 RM 方法估计旋翼叶片长度的误差在 1 cm 以内，相对误差值在 5% 以内，较 STFT 方法和 TSST 方法估计误差 2 cm 更精确。在实验过程中，由于各旋翼初始相位随机性，在时间幅度图呈现时域闪烁簇不相同，但闪烁次数相同，闪烁频率提取受噪声环境影响大，当信号底噪差时闪烁频率提取误差会增大。在表 4 中明显看到叶片长度估计相对误差大于旋翼转速估计相对误差，这是因为旋翼转速由闪烁频率一项特征值来估计，而叶片长度测算需综合闪烁频率和最大多普勒频率两个参数进行联合计算，由于这两个参数的提取偏差会在计算过程中叠加放大，使得旋翼转速的估计准确度更高。

通过表 4 的 3 种时频方法微动参数估计对比显示，基于 RM 时频分析方法提取时频图能量特征信息可以准确地提取

表 4 多旋翼无人机微动参数估计

无人机 型号	时频分析 方法	旋翼转速			叶片长度 /cm		
		理论值 / (r·s ⁻¹)	估计值 / (r·s ⁻¹)	相对误差 /%	理论值 /cm	估计值 /cm	相对误差 /%
大疆悟 2	STFT	25.00	25.00	0.0%	19.00	17.91	5.7%
	TSST		25.00	0.0%		17.91	5.7%
	RM		25.00	0.0%		19.40	2.1%
大疆御 2	STFT	32.50	31.25	3.8%	11.00	8.36	24.0%
	TSST		31.25	3.8%		9.18	16.6%
	RM		31.25	3.8%		10.74	2.4%
大疆 M350	STFT	29.00	30.00	3.4%	11.00	8.70	20.9%
	TSST		30.00	3.4%		8.70	20.9%
	RM		30.00	3.4%		11.19	1.7%
大疆 M600	STFT	27.00	26.70	1.1%	12.00	11.18	6.8%
	TSST		26.70	1.1%		11.18	6.8%
	RM		26.70	1.1%		12.57	4.8%

目标微动特征，TSST 方法频率分辨率改善不明显，验证了理论分析的正确性。

4 结语

本文通过时频分析提取时频图能量特征信息，对多旋翼无人机微动特征进行提取，结果表明基于 RM 方法提取时频图能量特征信息获得的微动特征更准确，微动参数估计精度最高。RM 方法对悬停状态多旋翼无人机微动参数估计相对误差在 5% 以内。对旋翼无人机转速和叶片长度的准确估计，不仅需要高时频分辨率的分析方法，同时对微动特征提取和参数估计方法要求也很高。未来将加强研究，改进微动特征提取和估计方法，扩大无人机型号识别范围，为多旋翼无人机的类型识别研究奠定基础。

参考文献：

[1] 张静, 张科, 王靖宇, 等. 低空反无人机技术现状与发展趋势 [J]. 航空工程进展, 2018,9(1):1-8.

[2] 王正刚, 康青, 荀怡佳, 等. 低慢小无人机对军事区域的安全威胁及其应对方法 [J]. 国防科技, 2021, 42(3):65-71.

[3] 何炜琨, 孙景波, 王晓亮, 等. 基于 RSP-CFD 方法的小型旋翼无人机微动特征提取 [J]. 信号处理, 2021,37(3):399-408.

[4] JIAN M, LU Z Z, CHEN V C.Experimental study on radar micro-doppler signatures of unmanned aerial vehicles[C]//2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). Piscataway: IEEE, 2017: 854-857.

[5] BOZDAG B O, ERER I.A comparative study on microDoppler signature generation methods for UAVs using rotorblade model[C]//2019 International Conference on Electrical and Electronics Engineering(ICEEE). Piscataway: IEEE, 2019: 298301.

[6] KIM Y, NAZAROFF M, OH D.Extraction of micro-doppler characteristics of drones using high-resolutiontime-frequency transforms[J].Microwave and optical technology letters, 2018, 60(10): 2949-2954.

[7] 孙景波. 旋翼无人机雷达回波微动特征分析与提取 [D]. 天津: 中国民航大学, 2021.

[8] 陈旭平. 高精度时频域高阶同步挤压算法研究与应用 [D]. 成都: 成都理工大学, 2021.

[9] AUGER F, FLANDRIN P, LIN Y T,et al.Time-frequency reassignment and synchrosqueezing:an overview[J].IEEE signal processing magazine,2013,30(6):32-41.

[10] 李粮余. 基于微多普勒谱图的多旋翼无人机识别 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

[11] 宋村夫, 曲智国, 胡旭超. 基于时频特征的旋翼目标微动参数估计方法 [J]. 计算机仿真, 2021,38(12):13-18.

[12] 陈永彬, 李少东, 陈文峰, 等. 直升机旋翼叶片回波建模与特性分析 [J]. 空军预警学院学报, 2015,29(5):322-327.

[13] 陈小龙, 袁旺, 杜晓林, 等. 多波段 FMCW 雷达低慢小探测数据集 (LSS-FMCWR-1.0) 及高分辨微动特征提取方法 [J]. 雷达学报, 2024,13(3):539-553.

【作者简介】

范克强（1999—），男，山东滨州人，本科，研究方向：雷达信号处理。

曹朋（1999—），男，河南驻马店人，本科，研究方向：雷达信号处理。

王江岩（1999—），男，河南平顶山人，本科，研究方向：雷达信号处理。

倪雪（1984—），女，江苏句容人，博士，研究方向：雷达信号处理。

（收稿日期：2025-03-28 修回日期：2025-08-04）