

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212188

# 基于改进 Kalmus 滤波的悬停无人机检测技术\*

范世琦<sup>1</sup> 涂刚毅<sup>2</sup> 申鑫<sup>2</sup>

(1.南京信息工程大学长望学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

**摘要:** 针对复杂杂波环境下悬停无人机检测问题,提出了一种改进的 Kalmus 滤波-剩余回波时域均值相消-自适应 CFAR 联合处理算法,对无人机微多普勒检测,实现空管监视目的。通过改进的 Kalmus 滤波器进行频域滤波,同时对目标回波高频信号和零频信号抑制,并提高零频附近微多普勒信号增益。采用剩余回波均值相消进行二次滤波,提高无人机高速旋翼的多普勒特征信号信噪比,采用短时傅里叶算法检测目标区域多普勒变化,最后通过恒虚警处理,进一步抑制杂波,提取微多普勒信息。试验结果表明本文算法可以对悬停无人机的旋翼多普勒特征进行有效检测,目标多普勒信号幅值提升了约 20 dB,实现低空监视管控目的。

**关键词:** 悬停无人机;微多普勒;短时傅里叶变换;改进的 Kalmus 滤波器;剩余回波均值相消

**中图分类号:** TN958.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Hovering UAV detection technology based on improved Kalmus filtering

Fan Shiqi<sup>1</sup> Tu Gangyi<sup>2</sup> Shen Xin<sup>2</sup>

(1. Changwang College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Aiming at the detection problem of hovering UAV in complex clutter environment, an improved Kalmus filter-residual echo time-domain mean cancelation-adaptive CFAR joint processing algorithm is proposed to detect micro-Doppler of UAV and realize the purpose of air traffic control monitoring. The improved Kalmus filter is used for frequency domain filtering, and the high frequency signal and zero frequency signal of target echo are suppressed at the same time, and the micro Doppler signal gain near zero frequency is improved. The residual echo mean cancellation was used for secondary filtering to improve the signal to noise ratio of Doppler characteristic signals of the UAV high-speed rotor. The short-time Fourier algorithm was used to detect Doppler changes in the target region. Finally, the constant false alarm processing was used to further suppress clutter and extract micro-Doppler information. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively detect the rotor Doppler characteristics of hovering UAV, and the amplitude of the target Doppler signal is increased by about 20 dB to achieve the purpose of low altitude monitoring and control.

**Keywords:** hover drone detection; micro-Doppler feature; short-term Fourier transform; Kalmus filter; the mean remaining echoes are canceled

## 0 引言

随着商用无人机的普及,无人机在军事和民用领域应用越来越广泛,也带来潜在的安全威胁<sup>[1-2]</sup>。同时由于小型无人机雷达散射截面(radar cross section, RCS)小,飞行高度低,易被地物杂波掩盖,特别是悬停状态的无人机,多普勒特征不明显,给雷达探测无人机带来了挑战,成为亟需解决的技术难题<sup>[3]</sup>。

目前已有学者从几何角度,利用外辐射源的多基一次雷达在低空布局,实现更高精度的无人机检测<sup>[4]</sup>,但其采用算法在面对低空悬停小型无人机时难以做到有效检测。常用机器视觉与图像处理特征检测方法解决小型无人机检测问题<sup>[5]</sup>,但视觉检测具有易受环境影响的局限性,不具有普适性。

本文通过对低慢小型无人机的特征建模分析,悬停状态下无人机其旋翼存在微多普勒特征。通过分析无人机旋

收稿日期:2022-11-24

\* 基金项目:军科委 173 计划(2021-JCJQ-JJ-0277)、南京信息工程大学人才启动项目(2022-r073)资助

翼微多普勒和微动频率特性<sup>[6-10]</sup>。针对回波中有效检测特征能量微弱的问题,有学者通过滤波、噪声对消等方法增强对目标的检测能力<sup>[11-12]</sup>,但悬停无人机微多普勒特征回波仍在距离门回波谱中出现混叠情况<sup>[13-14]</sup>,需要研究混叠情况下的悬停无人机微多普勒特征检测技术。

本文提出了一种改进的卡尔马斯(Kalmus)滤波-剩余回波时域均值相消-自适应恒虚警检测(constant false alarm rate detector, CFAR)联合处理算法,通过对检测区域里多普勒时频变化分析检测,调节信号能量阈值,判断是否有悬停小型无人机经仿真和试验验证,该联合检测算法能够有效提取悬停无人机的旋翼微多普勒特征,并增强目标回波能量。

## 1 无人机旋翼的微多普勒特征

### 1.1 旋翼叶片数学模型

无人机旋翼由多个散射中心组成,对于有个  $N$  叶片的旋翼,  $N$  个叶片有  $N$  个不同的初始旋转角:

$$\varphi_k = \varphi_0 + k \frac{2\pi}{N} (k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (1)$$

总接收信号为:

$$s_{\Sigma}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_{L_k}(t) = L \cdot e^{j\frac{4\pi}{\lambda}[R_0 + \tau_0 \sin\beta]} \cdot$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} \text{sinc}\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \varphi_0 + k \frac{2\pi}{N})\right\} e^{-j\Phi_k(t)} \quad (2)$$

式中:  $R_0$  为旋翼叶片中心到雷达的距离  $\Omega$  为旋翼叶片围绕机身中心的旋转角速度,  $t$  为时间,  $\lambda$  为电磁波波长,  $\beta$  为雷达观察到物体的俯仰角, 相位函数  $\Phi_k$  为:

$$\Phi_k(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \varphi_0 + \frac{2k\pi}{N}) \quad (3)$$

式中:  $L$  为旋翼中心到叶尖的长度。

叶片的时域特征幅度定义为:

$$|s_{\Sigma}(t)| = |L e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}[R_0 + \tau_0 \sin\beta]} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \text{sinc}\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \varphi_0 + k \frac{2\pi}{N})\right\} e^{j\Phi_k(t)}| \quad (4)$$

根据叶尖的长度和其旋转速率,得到叶尖的速度是  $V_p = 2\pi L \Omega$ , 因此,最大多普勒频移是  $\{f_D\}_{\max} = 2V_p \cos\beta / \lambda$ 。

可通过短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)来识别旋转叶片给雷达回波信号加上的调制引起的多普勒特性。由于信号相位函数的时间导数是信号的瞬时频率,对式(3)中的相位函数  $\Phi_k(t)$  以时间为变量进行求导,可得第  $k$  个旋转叶片引起的瞬时多普勒频率为:

$$f_{D,k}(t) = \frac{L}{\lambda} \Omega \cos\beta \left[ -\sin(\varphi_0 + \frac{2k\pi}{N}) \sin\Omega t + \cos(\varphi_0 + \frac{2k\pi}{N}) \cos\Omega t \right] \quad (5)$$

从式(5)可以看出,多普勒频率为旋转速率以两个正弦函数进行调制。

### 1.2 旋转旋翼叶片的 RCS 模型

如图 1 所示,将旋转旋翼叶片简化为一块均匀线性的矩形平板围绕平板中心以恒定角速度旋转,计算 RCS 特性参数,矩形平板 RCS 的一种近似公式:

$$\sigma = \sigma_{Peak} \sigma_{Aspect} = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} (\cos\theta \frac{\sin x_k}{x_k} \frac{\sin y_k}{y_k})^2 \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{Peak} = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$  为峰值 RCS,  $\sigma_{Aspect} = (\cos\theta \frac{\sin x_k}{x_k} \frac{\sin y_k}{y_k})^2$  为方向因子,  $x_k = ka \sin\theta \sin\varphi$ ,  $y_k = kb \sin\theta \cos\varphi$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ 。

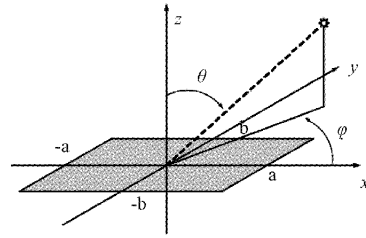


图 1 简化矩形平板

### 1.3 旋翼叶片雷达后向散射特性

无人机从所有叶片的雷达反射信号可以用相参叠加每个对立叶片反射信号来获得。

类比相参雷达系统发射一串脉冲宽度为  $\tau$  和脉冲重复间隔为  $\Delta T$  的窄矩形脉冲,则接收机中的基带信号是:

$$S_B(t) = \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{n=1}^{N_B} \sqrt{\sigma_n(t)} \text{rect}\left\{t - k\Delta T - \frac{2R_n(t)}{c}\right\} e^{-j2\pi f_c \frac{2R_n(t)}{c}} \quad (7)$$

式中:  $N_B$  是叶片的总数,  $n_p$  是观测区间内所接收的脉冲总数,  $f_c$  是雷达发射频率,  $R_n(t)$  是在时间  $t$  时雷达与第  $n$  个叶片之间的距离,  $\sigma_n(t)$  是在时间  $t$  时第  $n$  个叶片的 RCS,而  $\text{rect}$  是矩形函数,定义为  $\text{rect}(t) = 1(0 < t \leq \tau)$ 。

### 1.4 杂波模型

由于旋翼叶片回波信号较弱,且伴随较强的杂波干扰,擦地角较大的高分辨率雷达系统中,最常见的地杂波服从瑞利分布模型<sup>[15]</sup>。

其概率密度函数(probability density function, PDF)为:

$$f(l) = \frac{l}{\sigma_c^2} e^{-\frac{l^2}{\sigma_c^2}}, l > 0 \quad (8)$$

式中:  $l$  为杂波幅度,  $\sigma_c$  为  $l$  的均方差。

## 2 悬停无人机微多普勒联合检测

### 2.1 改进的 Kalmus 滤波器

微多普勒处理中,杂波中心频率一般为零频,因此本文利用 Kalmus 滤波器,先对地物杂波进行抑制,该滤波器的

频率响应在零多普勒频率处呈现快速的上升,以保证微多普勒目标的检测能力。但是常规 Kalmus 滤波器对复杂杂波环境下存在的高频杂波没有抑制作用,本文提出一种新型的改进的 Kalmus 滤波器。其原理及制作流程如下:

首先设计  $N_m$  组 MTI 级联 FFT 滤波器组,  $N_m$  组滤波器权值为:

$$\omega_{nk} = e^{j2\pi n \frac{k}{N_m}}, n = 0, 1, \dots, N_m - 1; k = 0, 1, \dots, N_m - 1 \quad (9)$$

式中:  $n$  表示第  $n$  个抽头,  $k$  表示第  $k$  个滤波器,每一个  $k$  值决定一个独立的滤波器响应,对应于一个不同的多普勒滤波器响应。因此,第  $k$  个滤波器的频率响应函数为:

$$H_k(f) = \sum_{n=0}^{N_m-1} e^{-j2\pi nk/N_m} e^{-j2\pi nk f T_r} = e^{-j\pi(N_m-1)(fT_r + \frac{k}{N_m})} \frac{\sin[\pi N_m (fT_r + \frac{k}{N_m})]}{\sin[\pi(fT_r + \frac{k}{N_m})]} \quad (10)$$

式中:  $T_r$  为脉冲重复频率,则得到滤波器的幅频特性为:

$$|H_k(f)| = \left| \frac{\sin[\pi N (fT_r + \frac{k}{N_m})]}{\sin[\pi(fT_r + \frac{k}{N_m})]} \right| \quad (11)$$

各滤波器具有相同的幅度特性,均为  $\text{sinc}(\cdot)$  函数,且等间隔地分布在频率轴上。滤波器峰值产生于  $\sin[\pi(fT_r + k/N_m)] = 0$  或者  $\pi(fT_r + k/N_m) = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots$ , 当  $k=0$  时,滤波器峰值位置为  $f=0, \pm 1/T_r, \pm 2/T_r, \dots$ , 即该滤波器中心位置在零频率以及重复频率的整数倍处,因此对地杂波有抑制能力。

将第 0 号和第  $N_m - 1$  号滤波器的幅频响应相减并取绝对值,可形成一个新的等效“滤波器”,其幅频响应如图 2 所示。

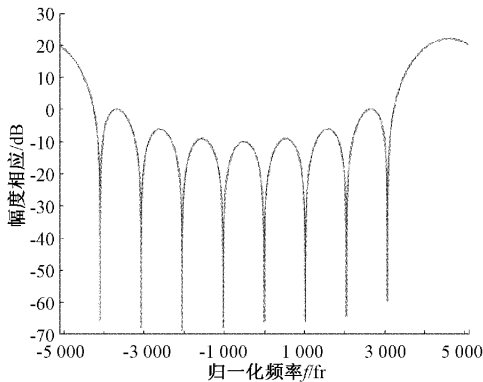


图 2 Kalmus 滤波器幅频特性

此后续联一个截止频率为  $N_m - 1$  低通滤波器,并进行加窗,可同时对高频信号和零频信号抑制,并对零频附近的微多普勒信号增益,增大信噪比,提高检测概率。此改进的

Kalmus 滤波器幅频特性如图 3 所示。

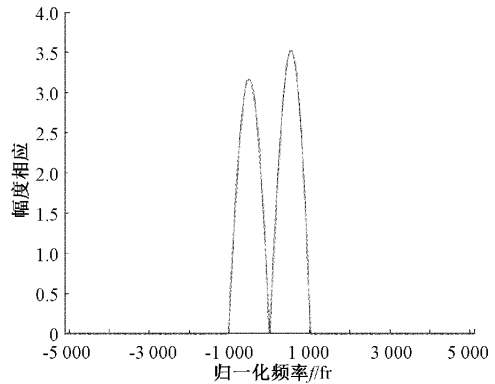


图 3 改进的 Kalmus 滤波器幅频特性

加窗前滤波器幅频特性为:

$$H(f) = \begin{cases} \left| \frac{\sin[\pi N_m (fT_r - \frac{1}{2N_m})]}{\sin[\pi(fT_r - \frac{1}{2N_m})]} - \frac{\sin[\pi N_m (fT_r + \frac{1}{2N_m})]}{\sin[\pi(fT_r + \frac{1}{2N_m})]} \right|, & |f| \leq H_s \\ 0, & |f| > H_s \end{cases} \quad (12)$$

### 2.2 剩余回波时域均值相消算法

剩余杂波时域均值相消实现的过程为:设置两组通道,一组为参考通道,一组为接收通道,将两组数据进行离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT),在频域利用改进的 Kalmus 滤波处理,再对剩余信号逆离散傅里叶变换(inverse discrete Fourier transform, IDFT)处理,称为剩余回波时域信号,最后利用时域均值相消算法对剩余信号进行处理。对于参考通道,针对采集的回波单元进行处理,处理过程为可以概括为:  $m, n$  为距离维采样点,  $i$  为周期维采样点,通过参考通道接收到的回波信号称为杂波时域信号,通过  $N_s$  个扫描周期建立一个稳定剩余杂波模型。其数学表达式如下:

$$C[m, n] = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} R[m, n, i] \quad (13)$$

其中,  $m, n$  为二维平面上可以确定唯一距离单元的序列号,  $i$  为雷达的扫描周期,建立一个稳定的杂波时域信号图后,通过时域均值相消算法的公式为:

$$R[m, n] = R[m, n] - C[m, n] \quad (14)$$

式中:  $R[m, n]$  为接收通道接收的时域信号。相比式(12)、(13)中,缺少了扫描周期的影响,这是因为通过  $N_s$  个周期扫描后,建立的均值杂波信号已处于稳定状态,在相同环境下不再受时间影响。

此时,  $R[m, n]$  可认为是对目标的微多普勒信息保留地较为干净的回波信号,达到了抑制地杂波的目的。最后对此信号进行 STFT、自适应恒虚警检测(constant false-alarm rate, CFAR)等处理,即可提取出悬停无人机的微多普勒特征信息。

### 2.3 仿真结果

综上所述,将本文信号处理流程概括为改进的 Kalmus

滤波-剩余回波时域均值相消-自适应 CFAR 联合检测算法。该算法步骤简单概括为:

- 步骤 1)多通道采集回波信号;
- 步骤 2)短时傅里叶变换得到多通道时频特性;
- 步骤 3)多通道信号频域 Kalmus 滤波;
- 步骤 4)剩余回波时域均值相消;
- 步骤 5)自适应恒虚警检测。

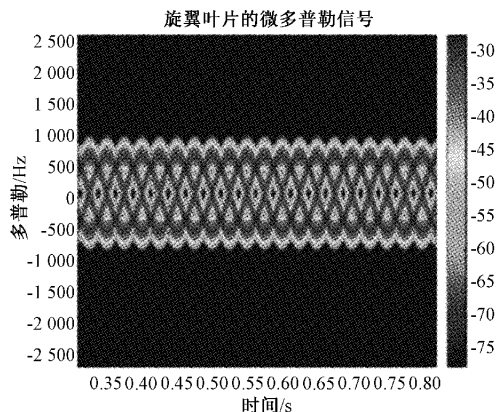
结合 2.1 节相关参数的计算,本文设置的雷达和无人机的主要参数如表 1 所示。

表 1 雷达和无人机主要参数

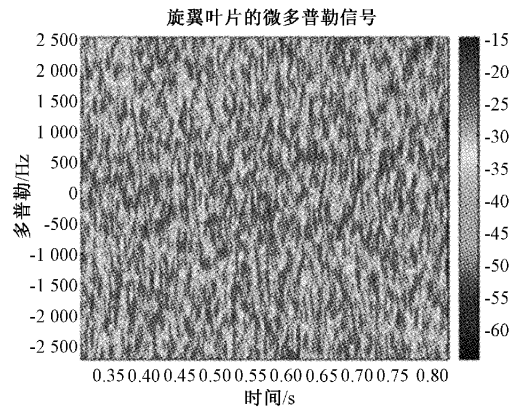
参数	数值
雷达位置/m	[500,0,500]
距离分辨率/m	0.5
发射和采集信号时间/s	1
发射信号脉内重复周期/ $\mu\text{s}$	$T_s = 10$
发射信号中心载频/GHz	5
发射信号带宽/MHz	20
无人机位置/m	[0,0,0]
浆翼叶片长/m	0.3
浆翼叶片与机身最短距离/m	0.1
浆翼叶片与机身最长距离/m	0.4
浆翼叶片宽/m	0.1
浆翼叶片个数	4

图 4(a)为仿真得到的目标回波信号,进行短时傅里叶变换后得到的时频多普勒特征图;图 4(b)为仿真生成的目标回波与地物杂波叠加信号,进行短时傅里叶变换后得到的时频多普勒特征图;图 4(c)为叠加信号,进行本文所述的联合信号处理算法后得到的时频多普勒特征图。

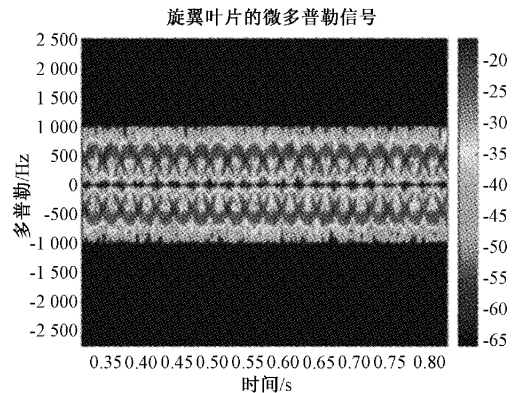
给出一种基于多普勒信号幅度的悬停无人机判别方法。利用峰值法参数估计对中求出每个采样时刻信号幅值峰值对应的多普勒单元,定义为集合  $U_d$ ,  $U_d$  中元素个数与采样点个数相同,记作  $L_d$ , 每个元素由唯一的时间单元和多普勒单元确定。



(a) 纯目标回波信号多普勒特征



(b) 目标回波与地物杂波叠加多普勒特征



(c) 本文算法处理后多普勒特征

图 4 不同情况下回波信号多普勒特征

对参考通道采集的杂波信号用本文算法处理,设求得时频信号为  $W(t, f)$ 。定义信号幅值阈值  $W$  为  $W(t, f)$  在  $U_d$  中多普勒单元对应信号幅值之和:

$$P = \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^{L_d} |W(i, j)| \quad i, j \in U_d \quad (15)$$

式中:  $T$  为时域总采样点数。本文算法处理中对微多普勒信号存在增益,将接收通道进行处理后的信号幅值与阈值合理倍数进行比较,即可判断有无悬停无人机存在。设处理后的时频信号为  $R(t, f)$ , 则判别方法表示为:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^{L_d} |W(i, j)| \geq \epsilon P, & \text{目标存在} \\ \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^{L_d} |W(i, j)| < \epsilon P, & \text{目标不存在} \end{cases} \quad i, j \in U_d \quad (16)$$

式中:  $\epsilon$  为对阈值  $W$  的放大倍数。 $\epsilon$  不为常数,由环境和检测强度决定。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验方案与配置

试验场景如图 5 所示,旋翼叶片长度约 0.3 m,宽度约 0.1 m 的四翼悬停无人机位于树林背景环境,环境中有多



种杂波干扰,选取中心载频 5 GHz、带宽 20 MHz 的连续波信号,通过雷达发送并持续接收,实现对悬停无人机检测。

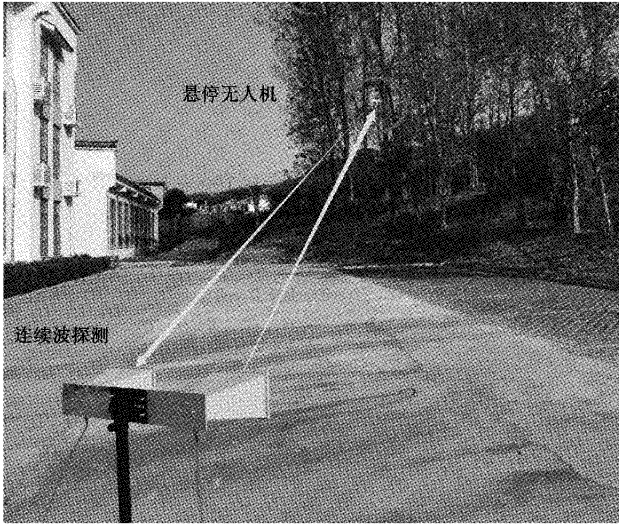
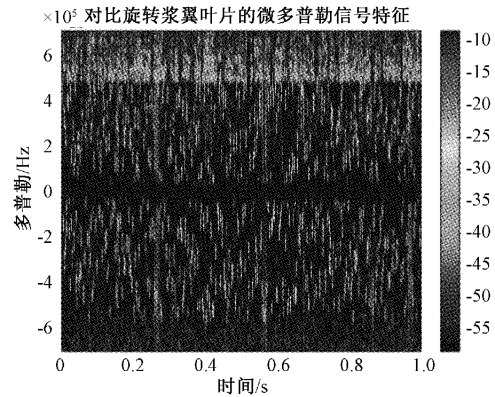


图 5 试验场景

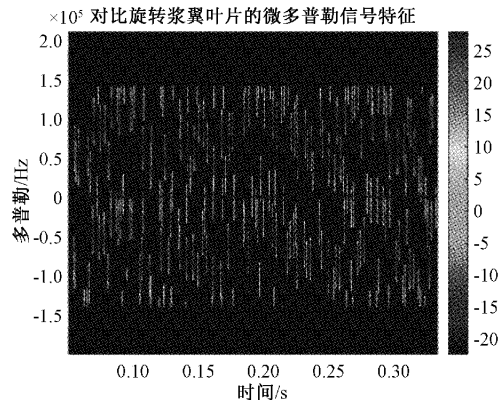
### 3.2 试验结果分析

图 6(a)为原始回波信号时频特征图,图中多普勒时频信息杂乱混叠,无法分离出背景杂波与目标回波信息,不能判断目标是否存在;图 6(b)为采用常规 MTI 和杂波图处理的对悬停无人机的微多普勒特征时频分析图,图中杂波受到明显抑制,但目标回波被认为是杂波,同时受到抑制,无法判断目标是否存在。图 6(c)为采用本文提出的 Kalmus 滤波-剩余回波时域均值相消-短时傅里叶变换(STFT)-自适应 CFAR 联合检测算法处理后的信号时频特性图。在图 6(c)中,可以明显看到有正弦调制多普勒时频波形存在,与理论仿真相同,分离出目标与杂波信息。通过信号幅度阈值判别法,可以判断出有悬停小型无人机存在。

图 7 中,信号峰值附近有多多个多普勒单元存在,是由于实际中旋翼叶片不能作为理想散射点,除叶片尖端有最大线速度外,较叶片尖端略靠近叶片中心的部分也有较大线速度,此两部分都会造成不被滤除的微多普勒频率偏移。另外,图 7 中 3 条不同线分别代表原始回波信号的多普勒



(b) 常规MTI和杂波图处理回波时频特性图



(c) 本文算法处理后回波时频特性图

图 6 回波信号不同处理后的时频特性

单元峰值;原始回波信号经过常规算法处理后的多普勒单元峰值;原始回波信号经过本文算法处理后的多普勒单元峰值。三者信号幅值上有着显著差异,本算法的信号幅值相较于其他两种有着明显提升。

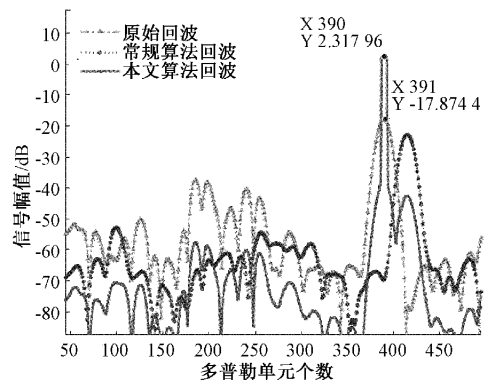
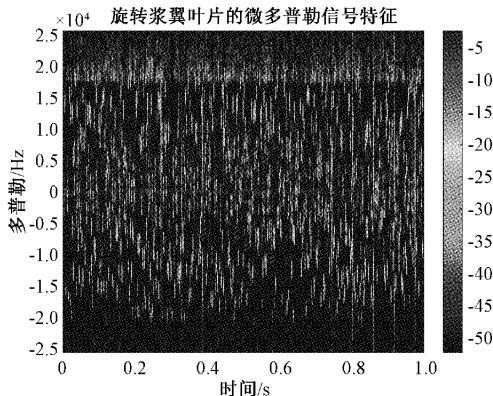


图 7 同一时刻多种处理信号多普勒维能量对比

表 2 列举了不同算法处理下测出多普勒峰值频率以及多普勒信号峰值常规处理后无人机多普勒单元产生了偏差,且与原始数据能量混杂,较难提取出有效信息。而本文算法处理后降低子噪声信号能量,且将目标多普勒信息幅值较处理前提高子 20 dB。通过第 2 章所述信号幅度阈值进行判断悬停无人机的存在具有可行性。达到预期要求。



(a) 原始回波信号时频特性图

表 2 不同算法处理的多普勒信息

算法	多普勒峰值单元	多普勒峰值/dB
原始数据	390	-17.874 4
常规算法处理	423	-24.731 1
本文算法处理	390	2.318 0

#### 4 结 论

针对复杂杂波环境下悬停无人机旋翼叶片微多普勒检测问题,本文提出了一种改进的 Kalmus-剩余回波时域均值相消算法-CFAR 联合检测和幅度阈值的判别方法。对该算法进行了试验测试,试验结果表明目标有效回波信号能量相对于杂波能量大幅提高,可实现对悬停无人机的有效检测,证明了算法的可行性。

#### 参考文献

- [1] 王双宇,彤鑫,肖东升,等. “低慢小”无人机反制技术发展现状与趋势[C]. 第十届中国指挥控制大会论文集(上册),2022:184-188.
- [2] 侯天浩,行鸿彦,刘洋. 多旋翼无人机在气象探测中的现状与展望[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(10):7-15.
- [3] 屈旭涛,庄东晔,谢海斌. “低慢小”无人机探测方法[J]. 指挥控制与仿真,2020,42(2):128-135.
- [4] 程擎,胡苗苗,史晓红,等. 基于外辐射源的多基一次雷达在低空布局研究[J]. 电子测量技术,2022,45(4):7-12.
- [5] 史雨馨,朱继杰,凌志刚. 基于特征增强 YOLOv4 的无人机检测算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(7):16-23.
- [6] MATTHEW R, FRANCESCO F, HERVE B, et al. Multistatic micro-Doppler radar feature extraction for classification of unloaded/loaded micro-drones[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2017, 11(1):116-124.
- [7] PASSAFIUME M, ROJHANI N, COLLODI G,

et al. Modeling small UAV Micro-doppler signature using millimeter-wave FMCW radar[J]. Electronics, 2021, 10(6):747.

- [8] WANG J, LI P, SUN J, et al. Micro-Doppler signal analysis based on the generalized S transform for radar targets [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(4):769-774.
- [9] LI T, WEN B, TIAN Y, et al. Numerical simulation and experimental analysis of small drone rotor blade polarimetry based on RCS and micro-Doppler signature [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(1):187-191.
- [10] PARK J, JUNG D H, BAE K B, et al. Range-Doppler map improvement in FMCW radar for small moving drone detection using the stationary point concentration technique [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(5):1858-1871.
- [11] 刘宇,吕晓德,杨鹏程. 一种无源雷达频域扩展相消批处理杂波对消算法[J]. 雷达学报,2016,5(3):293-301.
- [12] 马书笛. 雷达回波信号 MTI 与脉冲压缩研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
- [13] 卜子容. 基于微多普勒特性的无人机目标检测与参数估计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [14] 方鑫. 小型无人机目标雷达探测关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
- [15] 王皓. 复杂环境下无人机特征检测技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.

#### 作者简介

范世琦,本科,主要研究方向为雷达信号处理、电子战。

涂刚毅(通信作者),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为雷达系统技术。

E-mail: tугangyi@nuist.edu.cn

申鑫,硕士研究生,主要研究方向为 5G 信号处理、外辐射源雷达。