

基于自相关-倒谱联合分析的无人机旋翼转动频率估计方法

宋 晨 周良将* 吴一戎 丁赤飏

(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 准确估计无人机旋翼转动频率对于无人机的检测与识别具有重要意义。该文针对调频连续波雷达的无人机目标回波模型, 提出一种自相关-倒谱联合分析的无人机旋翼转动频率估计方法, 推导了无人机旋翼转动频率与雷达回波倒谱输出中周期性时延的映射关系, 通过加权均衡能够更有效地估计多旋翼无人机旋翼转动频率, 弥补了传统方法的不足。通过仿真和实际场景实验验证了方法的有效性。

关键词: 无人机; 微多普勒; 特征提取; 参数估计; 自相关-倒谱

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0255-07

DOI: 10.11999/JEIT180399

An Estimation Method of Rotation Frequency of Unmanned Aerial Vehicle Based on Auto-correlation and Cepstrum

SONG Chen ZHOU Liangjiang WU Yirong DING Chibiao

(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

(Institute of electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Accurately estimating rotor rotation frequency of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is of great significance for UAV detection and recognition. For the UAV target echo model of LFMCW (Linear Frequency Modulated Continuous Wave) radar, this paper proposes an auto-correlation and cepstrum to estimate the rotor rotation frequency of UAV, which derives the mapping relationship between the rotor rotation frequency of UAV and the periodic delay in the radar echo cepstrum output, and more effectively estimates the rotor frequency of multi-rotor UAV by weighted equilibrium, making up for the shortages of traditional methods. The effectiveness of the method is verified by simulation and real scene experiments.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Micro-Doppler; Feature extraction; Parameter estimation; Auto-correlation cepstrum

1 引言

多旋翼无人机具有体积小、操控简单、可搭载一定重物和适宜低空飞行等特点^[1], 为航拍、低空巡视、地物勘测等应用提供了极大便利。另一方面, 搭载爆炸物、监视监听设备等的无人机在军事重地、重要建筑物、机场等场所的上空执行非正常飞行任务, 很容易对公共安全造成严重危害^[2]。无人机旋翼转动形成的微多普勒特征是以多旋翼无人机为代表的“低慢小”目标区别于其它动目标的一种独有特征^[3], 可作为一种有效的检测手段^[4]。为了有效实现国家防空预警安全和社会治安管理,

利用微多普勒特征实现“低慢小”目标的检测及运动参数估计已经成为雷达目标检测中一个重要的研究热点。

文献^[5]最早研究微多普勒的数学模型和调制机理。针对目标微多普勒参数估计, 当前主要有时频分析和信号分离两类方法。

对于时频分析方法, 文献^[6]用短时傅里叶变换 (Short-Time Fourier Transform, STFT) 对微多普勒进行了分析, 由于受到Heisenberg测不准的约束, 使得微动目标参数估计造成较大误差^[7]。文献^[8]提出用魏格纳分布 (Wigner-Ville Distribution, WVD) 对微动目标回波进行处理, 但WVD会出现交叉项干扰, 导致时频分析结果中能量集中性降低。为了提高参数估计精度, 虽然参数化时频分析^[9-11]能有

效提高单分量微多普勒信号时频表示的集中度,但对于多分量情况下,各分量的时频表示集中度不能同时达到最优;另外,通过时频分析方法只能获取微多普勒信号在时频域的能量分布,要得到微动目标动力学参数,还需要在时频谱的基础上对其进行瞬时频率曲线提取,常用的方法有峰值位置估计^[12]以及1阶矩方法^[13],但是当信号信噪比较低的情况时各个微多普勒分量之间存在严重干扰,导致该方法输出误差较大。文献[14–16]提出时频分析结合Radon或Hough变换的参数估计方法,但该方法的估计精度依赖于时频分析方法,并且计算量大,同时这类方法对微多普勒信号形式有限定条件,对于进动等不满足正弦变换形式的状态无效。

对于信号分离方法,文献[17–19]中方法仅对时频交叠不严重的单分量微多普勒信号有效,而对于多分量微动目标,微多普勒信号在时频平面存在严重交叉现象,并且在实际场景中,由于雷达视角的原因,存在多个无人机旋翼之间相互遮挡,无法准确实现微多普勒信号分离和参数估计。文献[20]提出自相关法估计微多普勒周期,文献[21,22]提出采用倒谱法估计无人机旋翼转动频率,该方法不需要依赖于微多普勒信号形式等先验条件,但文中基于长时间窗积累后,先进行STFT变换后再进行倒谱变换,无法检测时间窗内无人机旋翼转动频率变化,而且这种方式计算量较大,不利于工程实现。另外,目前在公开文献中未发现倒谱法对于微多普勒参数估计的理论推导。

本文提出了一种自相关-倒谱联合估计多旋翼无人机转动频率方法,对倒谱法提取雷达回波中旋翼转动频率的原理进行了完整的理论推导,从理论上证明所提方法的正确性。并采用滑动窗的方式提取雷达回波,可准确获取时间窗内无人机旋翼转动频率变化,避免了仅采用倒谱法的局限性。

本文的结构如下:第2节构建了线性调频连续波(Linear Frequency-Modulated Continuous Wave, LFM CW)体制雷达观测多旋翼无人机的回波模型;第3节推导了倒谱法对于回波中微多普勒特征的数学映射关系;第4节对自相关-倒谱联合估计无人机旋翼转动频率方法进行了介绍,第5节基于理论仿真和实验数据验证了算法的有效性;第6节总结了全文。

2 多旋翼无人机目标在LFMCW体制雷达回波模型

LFMCW雷达对多旋翼无人机目标的观测几何模型如图1所示,雷达脉冲周期 T_p ;载频 f_c ;调频斜率 k ;参考时间 $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/c$ 。雷达到无人机质

心的距离为 R_C ,并将该点作为参考中心,即 $R_{\text{ref}} = R_C$,方位角和俯仰角分别为 β 和 α ,无人机旋翼叶片长度为 l ,叶片上某一散射点 P 到旋翼中心的距离为 r ($0 \leq r \leq l$),斜距为 $R_P(t_m, t_n)$, P 点以角速度 ω_d 旋转,初始旋转角为 φ_d 。旋翼转动频率为 f_d ,角速度 $\omega_d = 2\pi f_d$ 。

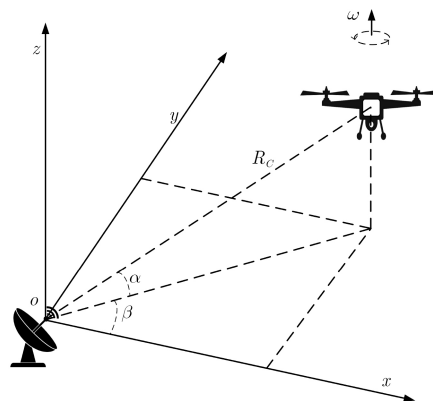


图1 雷达观测多旋翼无人机几何模型

由几何关系:

$$R_P(t_m, t_n) = R_C + l \cos(\omega_d t_m + \omega_d t_n + \varphi_d) \quad (1)$$

式中, t_m 为快时间, t_n 为慢时间。

对 P 点的雷达回波 $s_e(t_m, t_n)$ 进行脉冲压缩,补偿斜置项和残余视频相位(Residual Video Phase, RVP),化简后得到距离-慢时间域表达式:

$$S_d(f_m, t_n) \approx \frac{T_p}{1 + 2l\omega_d \sin(\omega_d t_n + \varphi_d)/c} \cdot \text{sinc} \left\{ \frac{T_p}{1 + 2l\omega_d \sin(\omega_d t_n + \varphi_d)/c} \left[f_m - \frac{4l\omega_d}{\lambda} \sin(\omega_d t_n + \varphi_d) + \frac{2kl}{\lambda} \cos(\omega_d t_n + \varphi_d) \right] \right\} \cdot \exp \left[j \frac{4\pi l}{\lambda} \cos(\omega_d t_n + \varphi_d) + j \frac{8\pi k R_C l}{c^2} \cos(\omega_d t_n + \varphi_d) \right] \quad (2)$$

根据式(2),可以计算出无人机旋翼转动频率以及叶片长度,进而判断无人机型号和运动状态。

3 倒谱法对于回波中微多普勒特征的数学映射关系

3.1 悬停状态下倒谱法对于回波中微多普勒特征的数学映射关系

距离-慢时间域中沿着时间轴提取目标位置所在的距离单元信号,即抽取式(2)中sinc函数峰值位置对应的固定值 f_{m0} ,式(2)中前两项可近似为常数

项, 此时可近似为随慢时间变化的1维微多普勒相位:

$$s_d(t_n) \approx T_P \cdot \exp \left[j \frac{4\pi l}{\lambda} \cos(\omega_d t_n + \varphi_d) \right] \quad (3)$$

式(3)改写成傅里叶级数展开形式:

$$s_d(t_n) = T_P \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \cdot \exp(jm\omega_d t_n + m\varphi_d) \quad (4)$$

可以看到, 经过微动调制后的雷达回波频谱相当于由关于零频对称的一簇成对谐波谱线组成, 谱线间隔 $\omega/2\pi$ 。首先对 $s_d(t)$ 进行傅里叶变换:

$$S_d(\omega) = F[s_d(t)] = |S_d(\omega)| \exp(jm\varphi_d) \quad (5)$$

其中 $|S_d(\omega)| = 2\pi T_P \left| \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \delta(\omega - m\omega_d) \right|$, 然后取 $|S_d(\omega)|$ 对数, 即对微多普勒信号功率谱进行同态解卷积处理, 得到

$$\begin{aligned} \ln(|S_d(\omega)|) &= \ln \left[2\pi T_P \left| \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot \delta(\omega - m\omega_d) \right| \right] \\ &= \ln 2\pi T_P + \ln \left[\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left| J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \right| \right. \\ &\quad \left. \cdot \delta(\omega - m\omega_d) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)中第2项中 $\delta(\cdot)$ 进行傅里叶级数展开:

$$\begin{aligned} &\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left| J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \right| \delta(\omega - m\omega_d) \\ &= \frac{1}{\omega_d} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left| J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \right| \exp \left(j \frac{2\pi}{\omega_d} m\omega \right) \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得到

$$\begin{aligned} \ln(|S_d(\omega)|) &= \ln 2\pi T_P + \ln \left\{ \left| \frac{J_0 \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right)}{\omega_d} \right| \left[1 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{m \neq 0} \frac{J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right)}{J_0 \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right)} \exp \left(j \frac{2\pi}{\omega_d} m\omega \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

对 $\ln(|S_d(\omega)|)$ 作逆傅里叶变换, 得到微多普勒信号倒谱表达式:

$$\begin{aligned} F^{-1}[\ln(|S_d(\omega)|)] &\approx \ln \left| \frac{2\pi T_P}{\omega_d} J_0 \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \right| \delta(t) \\ &\quad + \sum_{m \neq 0} \frac{J_m \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right)}{J_0 \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right)} \delta \left(t - m \frac{2\pi}{\omega_d} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

可见, 式(9)中第1项为雷达回波中的目标主体信号倒谱输出, 第2项为回波中微多普勒分量的倒谱输出, 体现了微多普勒周期特性; 并且微多普勒信号特征在倒谱中以 $\delta(t)$ 函数表征, 与雷达系统的带宽无关。另外, 对于多个旋翼雷达回波, 可以等效多个单旋翼目标对应的周期性冲激相应的线性叠加, 但会存在随时间单元增加, 冲激响应逐渐衰减, 多个冲激响应幅值不均衡的现象, 导致仅采用倒谱方法难以准确提取各个微多普勒分量参数。

4 自相关-倒谱联合估计无人机旋翼转动频率方法

为弥补前文所述仅采用倒谱或自相关方法检测多个微多普勒冲激响应的局限, 本文借鉴谱线均衡的思想, 提出一种自相关-倒谱联合估计无人机旋翼转动频率方法, 具体步骤如下:

(1) 雷达回波预处理。设定长度为 $2L+1$ 的滑动窗, 通过滑动窗提取距离-慢时间域中沿时间轴目标位置所在距离单元信号, 构建新序列 $s_d(n)$, $n \in [1, 2N]$, N 为截取的雷达回波长度;

(2) 计算自相关和倒谱。计算序列 $s_d(n)$ 的自相关, 记作 $\{R_d(1), R_d(2), \dots, R_d(N)\}$, 并按照本文第3节推导计算倒谱序列 $\{C_d(1), C_d(2), \dots, C_d(N)\}$;

(3) 各时刻输出点加权。借鉴背景均衡技术^[23], 为去除边缘效应, 将自相关和倒谱第 k 时刻对应的输出扩展为

$$\begin{aligned} &\{W(n) | n = 1, 2, \dots, N+2L\} \\ &= \{W_k(N-L), \dots, W_k(N), \dots, W_k(1), \dots, \\ &\quad W_k(N+L)\} \end{aligned} \quad (10)$$

按照式(10)对自相关和倒谱进行加权计算:

$$Q_k(n) = \alpha_k^R(n) R_k(n) + \alpha_k^C(n) C_k(n) \quad (11)$$

其中, $\alpha_k(n) = [W_k(n+L)] / \left\{ \frac{1}{2L+1} [W_k(N-L) + \dots + W_k(N) + \dots + W_k(N+L)] \right\}$ 表示第 k 时刻的加权系数, 上标 R, C 分别对应系相关和倒谱。在计算 $\alpha_k(n)$ 时, 由于设置为长度为 $2L+1$ 的滑动窗, 对应的分子选择 $W_k(n+L)$ 表示取滑动窗中间位置的值, 避免边缘效应。经过加权均衡后, 微多普勒信号周期性冲激响应由于占更高权重, 当滑动窗内存在冲激响应时, 比窗内相邻点有相对较高的强度, 则计算得到的加权系数 $\alpha_k(n)$ 也较大; 而当不存在冲激响应时, 背景噪声强度连续均匀, $W_k(n+L)$ 与相邻点平均强度接近, 计算得到的加权系数 $\alpha_k(n)$ 则会较小。因此在输出结果中将会增强, 并且避免出现单独采用自相关或倒谱导致随时间单元增加, 冲激响应逐渐衰减的现象, 同时加权后背景

干扰将会被有效抑制;

(4)微多普勒周期性多峰检测。在周期性多峰检测中主要依据以下3个方面作为判定标准:(a)满足连续时间内积累条件;(b)超过背景干扰门限;(c)满足局部极大值准则。如若满足3个标准,则说明微多普勒信号存在,否则沿慢时间单元继续搜索下一时间窗结果;

(5)对输出峰值点对应的时延插值转换,得到无人机旋翼转动频率。

上述估计多旋翼无人机转动频率的自相关-倒谱联合估计方法流程图如图(2)所示。

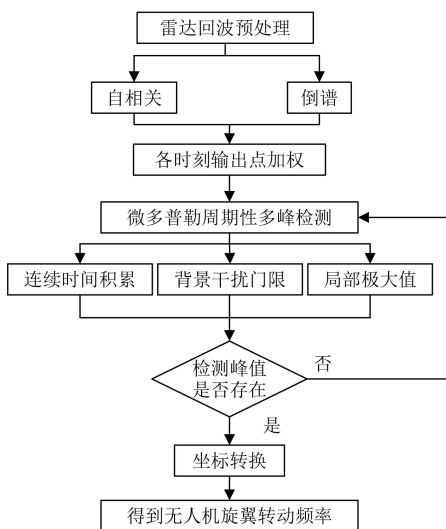


图2 自相关-倒谱联合估计方法流程图

5 实验结果与分析

5.1 仿真分析

本节仿真实验中采用Ka波段LFMCW体制雷达,系统参数如表1所示。假设场景中有一架四旋翼无人机,悬停状态下对角线的旋翼转动频率相同,分别为30 Hz, 25 Hz,无人机旋翼长度均为12.0 cm。

图3(a)、图3(b)分别给出了 $t_n = 0.6$ s时刻雷达

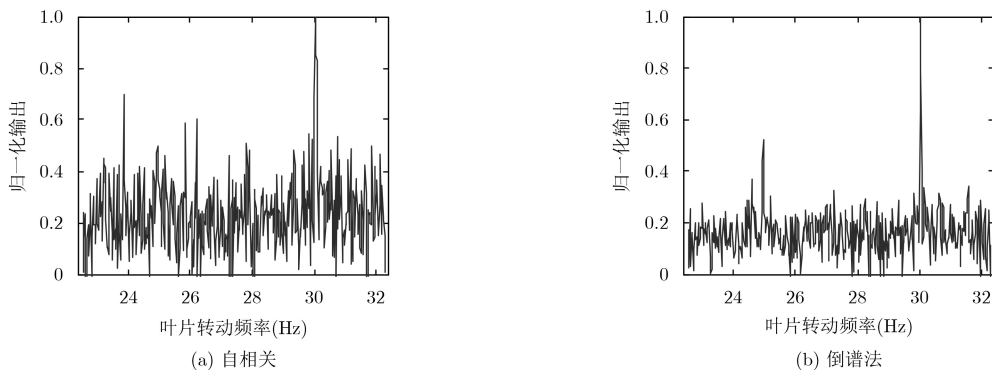


图3 传统方法仿真结果对比

表1 雷达系统参数

参数	数值
中心频率 f_0	34.6 GHz
带宽	1.2 GHz
PRF	31.25 kHz
无人机与雷达距离	200 m
原始回波SNR	0 dB
观测时间	1 s

回波采用单一自相关和倒谱方法对2个旋翼转动频率的估计结果,两幅图在30 Hz点处均有一冲激相应,具有较高的信噪比,说明雷达回波中存在转动频率为30 Hz的微多普勒信号分量,但两图中在25 Hz处冲激相应均不明显,尤其图3(a)中几乎被干扰噪声所淹没,该现象说明采用单一的自相关或者倒谱法对于估计多分量微多普勒信号参数具有局限性。

图4(a)为采用STFT对雷达回波进行时频分析,仿真表明,从STFT结果中无法直观准确提取各个微多普勒分量的运动参数,图4(b)为自相关-倒谱联合处理结果,在倒谱图结果中,能量集中在30 Hz, 25 Hz附近,表现为在倒谱域沿着时间轴有两条亮线,并且其数值随着时间轴保持不变,说明旋翼转动频率随时间不变,与仿真参数吻合,图4(c)为在 $t_n = 0.6$ s沿纵轴做切片,从结果可以看出,对比单一的自相关或者倒谱方法,本文提出的自相关-倒谱联合估计方法对于不同转动频率对应的冲击响应均得到增强,同时还可以有效抑制背景干扰和杂波干扰,提高了对无人机旋翼转动频率的辨识度和准确度。

为了定量分析不同方法对无人机旋翼转动频率估计的准确度,本文采用实际/估计旋翼转动频率功率比(ETR)来表征,即

$$ETR = 10 \lg \left[\frac{P(\omega)}{P(\omega - \hat{\omega})} \right] \text{ (dB)} \quad (12)$$

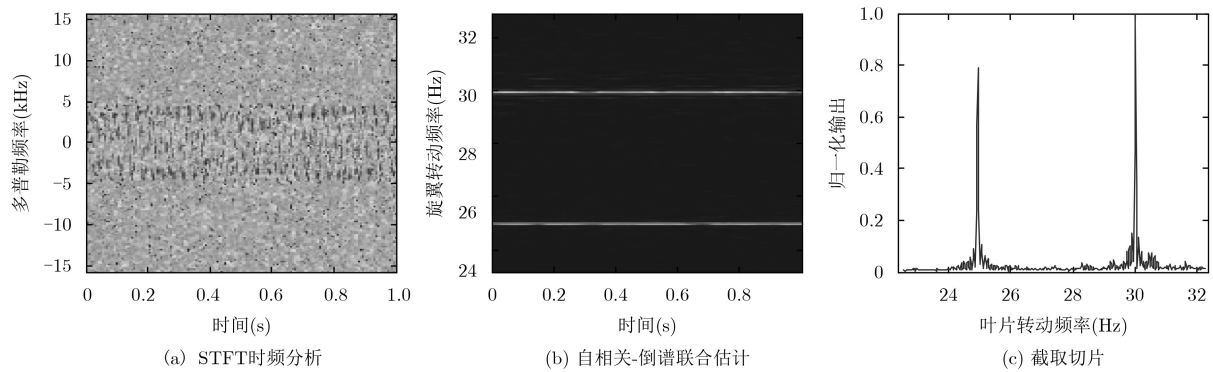


图4 仿真结果对比

其中, $P(\omega)$ 表示真实转动频率的功率, $P_{(\omega-\hat{\omega})}$ 表示误差功率, 估计值越接近实际值ETR值越大, 当估计值与实际值相同时, ETR为无穷大。在雷达回波中加入信噪比从-10~10 dB的高斯白噪声, 采用蒙特卡洛(Monte-Carlo)仿真, 图5给出了不同方法在对应信噪比下得到30 Hz, 25 Hz两个分量转动频率的ETR比较结果。

图5(a)为转动频率30 Hz分量的比较结果, 由于WVD-Hough方法产生严重的分量自交叉项, 不能正确体现多分量微多普勒信号真实的时频特征; STFT-Hough方法误差则主要取决于STFT时频集中度较差; 图5(b)为转动频率25 Hz分量的比较结果, 由于自相关只能检测信号主体周期, 因此对于

该分量无法实现。从图中可以看出, 本文提出的自相关-倒谱联合估计方法抗噪声性能以及估计精度均高于其它方法。

5.2 实测数据分析

为验证本文方法的有效性, 本节进行了悬停无人机微多普勒特征检测的外场实验, 实验使用Ka波段LMFCW体制雷达, 雷达系统参数如表1所示, 图6为不同旋翼转动频率估计方法处理结果对比, 图6(a)采用STFT对雷达回波进行时频分析, 由于信噪比较低, 时频分析结果中已经无法清晰得到微多普勒特性曲线, 更无法分别提取两个旋翼的雷达回波来对其分别进行参数估计, 只能大概估计其最大多普勒频移为3272 Hz, 换算得到无人机旋

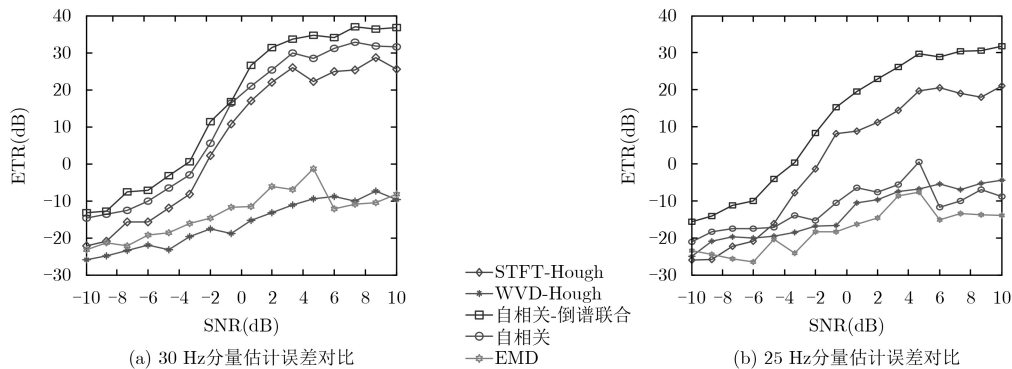


图5 不同方法旋翼转动频率估计误差对比

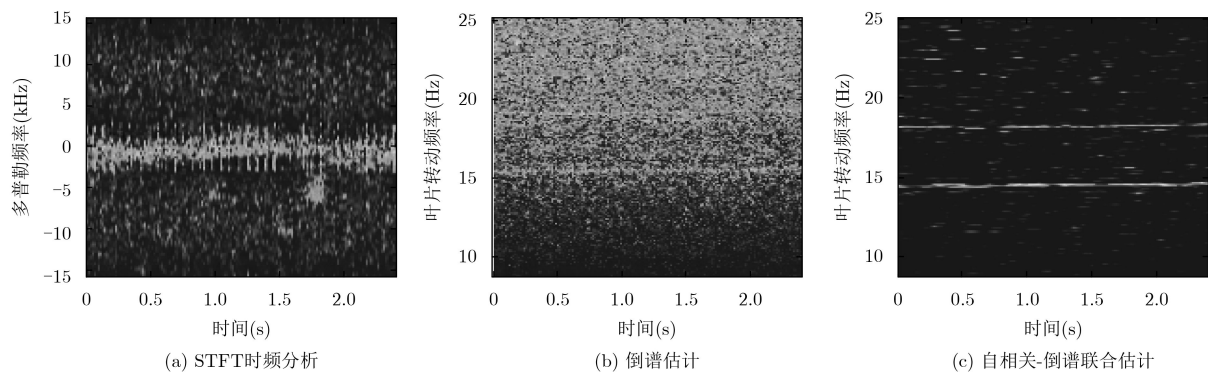


图6 不同旋翼转动频率估计方法处理结果对比

翼转动频率为17.85转/s; 图6(b)为采用倒谱单一处理得到的结果, 由于信号信噪比较低, 导致在倒谱结果中高频处混叠大量杂散点, 微多普勒分量被淹没在干扰噪声中, 使得估计结果不准确; 而在图6(c)中可以看出, 即使信噪比较低的情况下, 采用自相关-倒谱联合估计仍能准确提取两个旋翼的微多普勒分量, 对应的转动频率分别为18.23 Hz, 14.61 Hz, 实验表明该算法对微动参数估计有较高的准确率, 且在杂波环境中也具有可行性。

为检测本方法在无人机变速转动状态下微多普勒特征提取性能, 操控单个旋翼无人机使其旋翼变速转动, 分析结果如图7所示。图7(a)为对雷达回

波进行STFT分析得到的时频分布结果, 从图中可以看出, 无人机旋翼转动频率经历了先加速后减速过程, 相应的微多普勒带宽也先增大后减小, 但由于信噪比较低, 无法准确分辨回波中包含几个微动分量, 更无法得到各分量较为准确的转动频率等参数。图7(b)为自相关-倒谱联合估计方法结果, 可以得到, 无人机旋翼转动频率先从23转/s增加到51转/s, 然后再减速到21转/s, 本实验证明即使在低信噪比场景下, 本方法也可以得到无人机旋翼转动频率变化曲线, 从而在无人机的检测和监控中可准确得到无人机运动状态, 进而实现无人机目标的识别和分类。

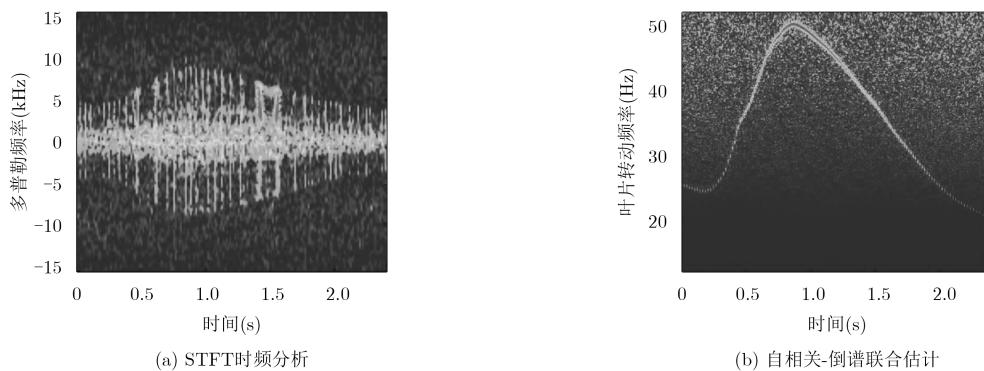


图7 旋翼变速转动处理结果

6 结束语

多旋翼无人机的旋翼微多普勒特征提取是无人机目标检测的一个关键问题, 而对无人机旋翼转动频率的准确估计是实现无人机检测与运动参数估计的一个重要环节。本文建立了调频连续波体制下无人机旋翼微多普勒雷达回波模型, 提出了一种自相关-倒谱联合分析估计多旋翼无人机转动频率方法, 避免了采用单一倒谱法的局限性, 并通过完整的理论推导论证了倒谱法提取旋翼转动频率的可行性。最后通过理论仿真和实际场景实验验证了本方法估计无人机旋翼转动频率的有效性和准确性。

参考文献

- [1] HOFFMANN F, RITCHIE M, FIORANELLI, *et al.* Micro-Doppler based detection and tracking of UAVs with multistatic radar[C]. Radar Conference, Philadelphia, USA, 2016: 1–6. doi: 10.1109/RADAR.2016.7485236.
- [2] CHEN Xinlin, XIAO Guangzong, XIONG Wei, *et al.* Rotation of an optically trapped vaterite microsphere measured using rotational Doppler effect[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(3): 036103. doi: 10.1117/1.OE.57.3.036103.
- [3] ZHANG Wenyu and LI Gang. Detection of multiple micro-drones via cadence velocity diagram analysis[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(7): 441–443. doi: 10.1049/el.2017.4317.
- [4] 黄小红, 贺夏, 辛玉林, 等. 基于时频特征的低分辨雷达微动多目标分辨方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2342–2347. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.0314.
- [5] HUANG Xiaohong, HE Xia, XIN Yulin, *et al.* Resolving multiple targets with micro-motions based on time-frequency feature with low-resolution radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2342–2347. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.0314.
- [6] CHEN V C, LI F, HO S S, *et al.* Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2–21. doi: 10.1109/TAES.2006.1603402.
- [7] ANDERSON M G and ROGERS R L. Micro-Doppler analysis of multiple frequency continuous wave radar signatures[C]. *Defense and Security Symposium*, Orlando, USA, 2007. 6547: 65470A-65470A-10. doi: 10.1117/12.719800.
- [8] 王璐, 刘宏伟. 基于时频图的微动目标运动参数提取和特征识别的方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1812–1817. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.01127.
- [9] WANG Lu and LIU Hongwei. Method for micro-motion target recognition and motion parameter extraction based

- on time-frequency analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1812–1817. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.01127](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.01127).
- [8] SPARR T and KRANE B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. *IEEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 277–283. doi: [10.1049/ip-rsn:20030697](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20030697).
- [9] SETLUR P, AMIN M, and THAYAPARAN T. Micro-doppler signal estimation for vibrating and rotating targets[C]. *IEEE Eighth International Symposium on Signal Processing and ITS Applications*, Sydney, Australia, 2005: 639–642. doi: [10.1109/ISSPA.2005.1581019](https://doi.org/10.1109/ISSPA.2005.1581019).
- [10] YANG Yang, PENG Zhike, DONG Xiaojin, *et al.* General parameterized time-frequency transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(11): 2751–2764. doi: [10.1109/TSP.2014.2314061](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2314061).
- [11] ANGRISANI L, D'ARCO M, MORIELLO R S L, *et al.* Warblet transform based method for instantaneous frequency measurement on multicomponent signals[C]. *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*. Montreal, Canada, 2004: 500–508. doi: [10.1109/FREQ.2004.1418509](https://doi.org/10.1109/FREQ.2004.1418509).
- [12] VISHWAKARMA S and RAM S S. Detection of multiple movers based on single channel source separation of their micro-Dopplers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2018, 54(1): 159–169. doi: [10.1109/TAES.2017.2739958](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2739958).
- [13] KANG Wenwu, ZHANG Yunhua, and DONG Xiao. Micro-Doppler effect removal for ISAR imaging based on bivariate variational mode decomposition[J]. *IET Radar Sonar & Navigation*, 2018, 12(1): 74–81. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0104](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0104).
- [14] LIU Yixing, LI Xiang, and ZHUANG Zuwen. Estimation of micro-motion parameters based on micro-Doppler[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(3): 213–217. doi: [10.1049/iet-spr.2009.0042](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2009.0042).
- [15] STANKOVIC L, DJUROVIC I, and THAYAPARAN T. Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1496–1506. doi: [10.1109/TAES.2006.314590](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.314590).
- [16] THAYAPARAN T, STANKOVIĆ L, and DJUROVIĆ I. Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2008, 345(6): 700–722. doi: [10.1016/j.jfranklin.2008.01.003](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2008.01.003).
- [17] CAI Chengjie, LIU Weixian, FU Junshan, *et al.* Empirical mode decomposition of micro-Doppler signature[C]. *IEEE International Radar Conference*, Arlington, Virginia, USA, 2005: 895–899. doi: [10.1109/RADAR.2005.1435954](https://doi.org/10.1109/RADAR.2005.1435954).
- [18] LAI Caiping, RUAN Quan, and NARAYANAN R M. Hilbert-Huang Transform (HHT) processing of through-wall noise radar data for human activity characterization[C]. *IEEE Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics*, Washington, DC, USA, 2007: 1–6.
- [19] THAYAPARAN T, ABROL S, and QIAN S. Micro-Doppler analysis of rotating target in SAR[R]. *Defence Research and Development Canada Ottawa (ONTARIO)*, 2005.
- [20] WALTER M, SHUTIN D, and DAMMANN A. Time-variant Doppler PDFs and characteristic functions for the vehicle-to-vehicle channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(12): 10748–10763. doi: [10.1109/TVT.2017.2722229](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2722229).
- [21] FUHRMANN L, BIALLOWONS O, KLARE J, *et al.* Micro-Doppler analysis and classification of UAVs at Ka band[C]. *2017 18th IEEE International Radar Symposium (IRS)*, Prague, Czech Republic, 2017: 1–9. doi: [10.23919/IRS.2017.8008142](https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008142).
- [22] LUCA P, PAOLO C, and FABRIZIO B. Radar micro-Doppler mini-UAV classification using spectrograms and cepstrograms[J]. *International Journal of Microwave & Wireless Technologies*, 2015, 7(3/4): 469–477. doi: [10.1017/S1759078715001002](https://doi.org/10.1017/S1759078715001002).
- [23] 芦俊, 张颜岭, 张凤园. 一种被动声呐线谱背景均衡算法[J]. *声学与电子工程*, 2016(3): 20–22.
- LU Jun, ZHANG Yanling, and Zhang Fengyuan. A passive sonar line spectrum background equalization algorithm[J]. *Acoustics and Electronic Engineering*, 2016(3): 20–22.
- 宋晨: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、目标检测与识别等。
- 周良将: 男, 1981年生, 副研究员, 研究方向为合成孔径雷达系统设计、系统误差补偿及其相关信号处理技术。
- 吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为高分辨机载合成孔径雷达及运动补偿技术、SAR信号处理算法、遥感卫星地面处理与应用系统的体系结构、数据处理算法等。
- 丁赤飏: 男, 1969年生, 研究员, 研究方向为先进合成孔径雷达系统和信号处理技术、数字信号处理、信息系统技术等。