

基于逆合成孔径雷达的旋翼目标微动参数分层式估计方法研究



许志勇¹, 田巴睿¹, 许克勤², 陈琛¹

1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094

2. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

摘要:在对螺旋桨目标的逆合成孔径雷达(ISAR)成像研究中,通过分析回波微多普勒特征,实现螺旋桨特性参数提取,对于完善螺旋桨目标散射特性分析具有重要意义。本文提出了一种分层式的微动参数估计方法,将传统的三维参数搜索简化为三个一维优化问题,实现对旋翼转速、桨叶初相角、桨叶长度的解耦估计。与现有方法相比,该方法具有计算复杂度低、运行时间短等优点,并且能实现方位向欠采样下的准确旋翼参数估计。仿真和实测数据试验表明,该方法旋翼参数估计精度高,运行时间仅为传统遍历算法的10%左右。本文为螺旋桨目标微动特征分析提供了一种高效解决方案,有效地降低了数据采集和处理时的硬件需求。

关键词:逆合成孔径雷达; 旋翼目标; 微多普勒特征; 参数估计; 参数解耦

中图分类号:P225.7

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.07.008

逆合成孔径雷达(ISAR)技术能够获得非合作目标的雷达图像,是飞行器目标散射特性研究中的重要手段^[1]。传统的ISAR成像往往假设目标为刚体结构,而以直升机、旋翼无人机为代表的螺旋桨目标,其螺旋桨转动会导致雷达回波受到额外的正弦相位调制,即微多普勒效应。一方面,微多普勒效应会导致传统的ISAR成像质量受到影响;另一方面,目标的微多普勒特征也反映了其螺旋桨的转速、尺寸等信息。对微多普勒特征开展研究,实现螺旋桨特性参数提取,对于完善螺旋桨目标散射特性分析具有重要意义^[2-3]。

微多普勒特征本质上是由螺旋桨的转动产生,具有明显的时变特性。因此,短时傅里叶变换(STFT)、Wigner-Ville分布(WVD)等时频(TF)分析方法被广泛应用于微多普勒特征提取。Zhang Rui等^[4]在时频谱图中,利用各频率成分的出现频率来区分机身刚体部分与旋翼微多普勒特征。此外,Wang Shibin等^[5]使用匹配同步压缩小波变换代替传统的TF分析。此举提高了TF域的时间分辨率,从而有助于估计旋转频率。类似地,学者们也从谱分析的角度

对微多普勒效应进行了研究。Andi等^[6]提出了一种从多旋翼无人机频谱中提取直升机旋转调制线(HERM)的算法。Wu Kun等^[7]利用长时间频谱处理(LTSP)手段,提出了一种多旋翼无人机倒谱的多谐波分离方法。此外,Ahmad等^[8]利用卷积神经网络估计无人机目标的旋翼物理参数。该网络体量较小,处理延迟较低,能够从0.3 s的短时数据提取目标微多普勒特征。在微多普勒分析中,也有学者对旋转部件的雷达回波模型进行修正,提出了喷气发动机调制(JEM)理论^[9]。理论证明,从频谱参数可以估计出旋转部件的旋转频率和叶片长度等特性。JEM效应通常用于不同目标的旋转部件识别和分类^[10-11]。然而,上述方法存在一定的局限性。基于TF分析的方法虽然结构简单,但存在时间分辨率和频率分辨率的冲突,估计精度有限。此外,对于旋翼无人机来说,雷达脉冲重复频率(PRF)不足导致的多普勒频率混叠是非常常见的现象,在这种情况下,TF分析和频谱分析都不适用。

另一类微多普勒分析方法可以概括为参数类方法,即用参数化基函数对回波进行拟合,实现微多普勒表征。旋

收稿日期: 2024-12-25; 退修日期: 2025-03-17; 录用日期: 2025-04-15

基金项目: 航空科学基金(20220013059001)

引用格式: Xu Zhiyong, Tian Sirui, Xu Keqin, et al. Multi-stage parameter estimation method for the Micro-Doppler of rotor targets using ISAR[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(7): 57-66. 许志勇, 田巴睿, 许克勤, 等. 基于逆合成孔径雷达的旋翼目标微动参数分层式估计方法研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(7): 57-66.

翼的回波模型表现出正弦相位调制特点,因此,基于曲线检测的Radon变换类方法被广泛应用于旋转部件ISAR图像的重建^[12-13]。Wang Qi等^[14]提出了一种针对旋转空间碎片的成像算法,利用广义Radon变换实现慢时间域非相参积累。此外,白雪茹等^[15]设计了复数逆Radon变换算法(CIRT),得到了安-26飞机的两个旋翼图像。基于相参积累的CIRT可以显著提高重建图像的分辨率。但在处理低PRF的回波时,相位混叠会产生假能量尖峰,导致无法准确估计叶片长度。此外,CIRT是通过反向投影算法(BP)实现的,需要对参数空间进行遍历搜索,计算量较大。Ji Guangyu等^[16]设计了一种三参数正弦解调算子,通过相位补偿实现相参积累,但其参数估计也需要对参数空间遍历,耗时较长。总之,现有的参数化方法具有较高的微多普勒特征估计精度,但往往存在计算复杂、耗时长的问题。此外,当处理低PRF的方位欠采样数据时,参数化算法的性能会明显下降。

现阶段针对微多普勒特征的研究,特别是对旋转部件的物理参数提取,仍然面临较大挑战。现有的方法通常采用多维参数搜索的思想,计算量大且缺乏对旋转部件先验知识的利用;此外为保证性能,需要足够的PRF。为了实现高效准确的微多普勒特征提取,本文借助参数化相位补偿项,创新性地提出了一种旋翼参数分层式估计方法,即按照旋翼转速—叶片初相角—叶片长的顺序逐个估计,大幅简化算法结构,提高计算效率。此外,本文借助压缩感知理论,设计了基于相位补偿项的过完备字典,将桨叶长度估计转化为稀疏重建问题,并利用正交匹配追踪(OMP)算法进行求解,所提方法可以在低PRF条件下实现旋翼参数的准确估计,降低对数据采集系统的硬件要求,普适性好。

1 旋翼目标ISAR观测模型

以旋翼无人机为例,基于ISAR的旋翼无人机观测几何构型如图1所示。值得注意的是,在探测性能与硬件成本的权衡考虑之下,本文采用77 GHz频段的毫米波雷达作为观测设备,其波长约为0.004 m,因此,无人机目标仍可用散射点模型来近似表示。图1中, OXY 为建立在目标投影平面的直角坐标系,其中 O 为目标刚体部分的等效旋转中心, OY 为雷达观测方向,假设无人机的运动速度为 v ,其等效旋转速度为 ω_r 。散射点 Q 为无人机旋翼的转轴,同时也是刚体部分的代表之一,则散射点 $Q(x_q, y_q)$ 与雷达之间的距离 $R_{r,Q}(t)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} R_{r,Q}(t) &= R_0(t) + x_q \sin(\theta(t)) + y_q \cos(\theta(t)) \approx \\ &R_0(t) + x_q \theta(t) + y_q \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $R_0(t)$ 是雷达与原点 O 之间的距离, $\theta(t) = \omega_r t$ 表示 t 时刻的旋转角度。式(1)的近似是基于较短相参积累时间(CPI)内,目标刚体部分转角较小而实现的。

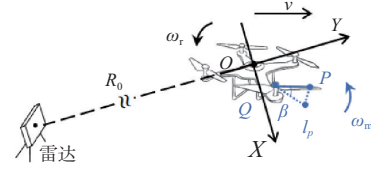


图1 旋翼无人机的ISAR观测几何

Fig.1 The ISAR observing geometry of a UAV with rotors

此外, P 为旋翼上的一个散射点。假设该旋翼的转速为 ω_m ,则散射点 P 与雷达之间的距离可以表示为

$$\begin{aligned} R_{m,P}(t) &= R_{r,Q}(t) + l_p \cos \beta \cos(\omega_m t - \theta_{0,P}) \approx \\ &R_0(t) + x_q \theta(t) + y_q + l_p \cos(\omega_m t - \theta_{0,P}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $l_p = L_p \cos \beta$ 为 P 和 Q 两点在目标投影平面的距离, L_p 是 P 和 Q 两点在桨叶上的距离, β 为目标相对于观测点的仰角, $\theta_{0,P}$ 为CPI内散射点 P 的初相角。

假设雷达发射线性调频信号。由于对刚体部分的ISAR运动补偿方法已较为成熟,不失一般性,则完成平动补偿后的旋转部件雷达回波可以表示为

$$\begin{aligned} h_m(t_m, \tau) &= \sum_{k=1}^K \sigma_{m,k} \text{sinc}[B(\tau - \frac{2R_{m,P}(t_m)}{c})] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 + y_q)) \cdot \\ &\exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} (x_q \omega_r t_m + l_k \cos(\omega_m t_m - \theta_{0,k}))) + n(t_m, \tau) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t_m 为慢时间, τ 为快时间;旋转部件由 K 个散射点组成,其幅度为 $\sigma_{m,k}$ 。 B 为发射信号的带宽, λ 发射信号波长, c 为雷达信号的传播速度。 $n(t_m, \tau)$ 为杂波和噪声。此外,相位项 $\exp(-j4\pi x_q \omega_r t_m / \lambda)$ 仅与机身部分的等效转动有关,因此,该项可以通过估计机身部分的多普勒频率来进行补偿。

对于小型无人机而言,其旋翼尺寸往往较短。假设旋翼部分的距离单元走动可以被忽略,则旋翼所在的距离单元回波可以近似表示为

$$\begin{aligned} h_m(t_m) &= \sum_{k=1}^K \sigma'_{m,k} \exp(-j \frac{4\pi f_c}{c} (R_0 + y_q)) \cdot \\ &\exp(-j \frac{4\pi f_c}{c} (l_k \cos(\omega_m t_m - \theta_{0,k}))) + n(t_m) \end{aligned} \quad (4)$$

对于单个散射点而言,其瞬时多普勒频率可以计算为

$$f_d(t_m) = \frac{2f_c}{c} (l_k \omega_m \sin(\omega_m t_m - \theta_{0,k})) \quad (5)$$

以大疆mini-2无人机为例,其叶片长度约为0.06 m,悬停状态下的旋翼转速可达到150 r/min。则根据式(5),目标的最大多普勒频率 f_{dmax} 约为29 kHz。对于常见的低空检测

雷达而言,其PRF一般很难达到 $2f_{\text{dmax}}$,因此,传统的谱分析类方法将因混叠而失效。

2 旋翼目标参数估计

由式(4)中的信号模型可知,旋翼旋转导致的回波正弦相位项将会导致其信号能量无法通过传统的傅立叶变换进行积累。为解决该问题,参考文献[16]提出了一种基于信号解调的方法,该方法通过设计以下参数化的相位补偿项,将旋翼参数估计问题转化为优化问题进行求解

$$e_{\sin}(t_m; l, \omega_m, \theta_0) = \exp(-j \frac{4\pi f_c}{c} (l \cos(\omega_m t_m - \theta_0))) \quad (6)$$

然而,参考文献[16]中,优化问题是通过三维参数搜索解决的,该方法计算量大,难以应用于实时系统。本文提出了一种分层式旋翼参数估计策略,该策略将三维参数搜索问题转化为三个一维参数优化问题,实现了参数解耦,借助压缩感知相关方法实现了低PRF条件下的旋翼参数准确估计。

2.1 基于JEM理论的旋翼参数估计

根据JEM理论,单个桨叶的回波可以由旋翼散射点回波沿桨叶方向积分得到

$$h_m(t_m) = \sum_{n=0}^{N-1} \sigma \int_0^L \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} (l \cos(\theta_{0,n} + \omega_m t_m))) dl \cdot \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 + y_Q)) = \sum_{n=0}^{N-1} \sigma L \text{sinc}(\frac{2\pi}{\lambda} L \cos(\theta_{0,n} + \omega_m t_m)) \cdot \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 + y_Q + \frac{L}{2} \cos(\theta_{0,n} + \omega_m t_m))) \quad (7)$$

式中, N 为桨叶个数, L 为桨叶长度,暂时忽略噪声项的影响。通过式(7)的信号模型可知,桨叶回波的幅度表现为一个呈周期变化的sinc函数,因此,旋翼转速 ω_m 可以通过计算回波的自相关函数进行估计。在大多数情况下,基于自相关的方法简单有效;但由于仅利用了回波振幅,该方法的分辨率通常有限,而且对噪声和杂波很敏感。

对式(7)进行傅立叶变换,可得

$$H_m(f) = \sum_{s=-S}^S A_s \delta(f + sf_T) \quad (8)$$

根据JEM理论,旋翼桨叶回波模型的频谱由一系列线谱组成,线谱之间的间隔为 $f_T = \alpha N \omega_m / 2\pi$,其中当桨叶个数 N 为奇数时, α 取2;当 N 为偶数时, α 取1。换言之,旋翼转速的估计也可以通过提取频域中的线谱间隔来实现。基于JEM理论的方法具有更好的转速估计精度,并且不受窄带杂波的影响;但在低PRF情况下,严重的混叠可能会导致线谱提取失败。

总的来说,旋翼转速的估计既可以采用基于自相关的方法,也可以采用基于JEM的方法。两者各有利弊,在实际应用中应加以权衡。此外,上述两种方法均只能得到旋翼回波的周期信息,而由于旋翼存在多个叶片,欲得到真实的转速还需要更多的信息。

2.2 桨叶初相角估计

如前文所述,目标桨叶回波模型的频谱是由一系列等间隔的线谱组成。本节对该频谱结构的形成进行分析,在此基础上进一步设计了CPI内的桨叶初相角的解耦估计方法。

根据式(7),单个桨叶的回波可以重写为

$$h_b(t_m) = a(t_m) \exp(-j\varphi(t_m)) = a(t_m) w(t_m) \quad (9)$$

式中, $a(t_m)$ 为回波的幅度项, $w(t_m)$ 为相位项。因此,其频谱可以表示为两部分的卷积,即

$$H_b(f) = A(f) \otimes W(f) \quad (10)$$

由于幅度项 $a(t_m)$ 是周期为 $T_p = 2\pi/\omega_m = 1/f_p$ 的实周期函数,可以通过傅里叶级数展开的方法将其进一步表示为

$$a(t_m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \exp(j2\pi n f_p t_m) \quad (11)$$

式中, $\{a_n\}$ 为呈共轭对称的傅立叶系数。因此,可以得出结论,幅度项的频谱 $A(f)$ 为线谱,谱线出现在 $f = n f_p$ 处。

类似的,相位函数 $\varphi(t_m)$ 也可以通过傅立叶级数展开的方式近似表示为

$$\varphi(t_m) \approx \sum_{n=0}^M \beta_n \sin(2\pi n f_p t_m + \psi_n) \quad (12)$$

式中, β_n 为傅立叶系数, ψ_n 为 n 次谐波的相位角。 $w(t_m) = \exp(-j\varphi(t_m))$ 可以通过贝塞尔函数进一步展开

$$w(t_m) \approx \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{k_M=-\infty}^{\infty} [\prod_{j=1}^M J_{k_j}(\beta_j)] \cdot \exp(j \sum_{n=1}^M 2\pi k_n f_p t_m) \exp(j \sum_{n=1}^M k_n \psi_n) \quad (13)$$

式中, $J_k(\cdot)$ 为 k 阶第一类贝塞尔函数。则频谱 $W(f)$ 可以通过对式(12)进行傅立叶变换得到

$$W(f) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \gamma_l \delta(f - l f_p) \quad (14)$$

γ_l 可由贝塞尔函数的系数计算得到。由上述分析可知,桨叶回波的频谱 $H_b(f)$ 是由两个具有相同线谱结构的频谱函数卷积所得, $H_b(f)$ 的频谱结构与二者相同,其线谱也出现在 $f = n f_p$ 处。

为实现对初相角的解耦估计,相位补偿项可被限制为

$$e_{\sin}(t_m; \hat{\theta}_0) = \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \hat{L} \cos(\hat{\omega}_m t_m - \hat{\theta}_0)) \quad (15)$$

式中, $\hat{\theta}_0$ 指代初相角估计值。需要强调的是,此处的 $\hat{L}$ 只会影

响贝塞尔函数系数的取值,因此,可将 $\hat{L}$ 设为常数,即 $\hat{L} = 0.5\Delta r$,其中 Δr 为距离分辨率。将目标回波与相位补偿项 $e_{\sin}(t_m; \hat{\theta}_0)$ 相乘并进行傅立叶变换,则当且仅当 $\hat{\theta}_0 = \theta_{0,k}$ 时,线谱幅度会达到最大值。这是因为 $e_{\sin}(t_m; \hat{\theta}_0)$ 与 $w(t_m)$ 有着相似的信号形式,时域上乘以 $e_{\sin}(t_m; \hat{\theta}_0)$,对应在频域表现为线谱的卷积,卷积后的线谱只有在初始相位相同的情况下才会相干累积并达到最大值。因此,桨叶初相角的估计可以表示为

$$\hat{\theta}_0 = \arg \max_{\hat{\theta}_0} |F[h_b(t_m) \cdot e_{\sin}(t_m; \hat{\theta}_0)]|, \hat{\theta}_0 \in [-\pi, \pi] \quad (16)$$

式中, $F[\cdot]$ 表示进行傅里叶变换。由于初相角 $\hat{\theta}_0$ 的范围仅局限为 $[-\pi, \pi]$,式(16)可以通过简单的一维遍历进行求解。值得一提的是,这种遍历求解的方式是必要的,可以用于确定正确的转速值。当使用正确的转速估计值进行遍历时,曲线峰值个数将与桨叶个数假设相符;反之当使用错误的转速估计值遍历时,曲线表现为多个无规律的峰值。仿真试验将进一步说明该结果。

2.3 桨叶长度估计

现有的基于谱分析的或基于参数匹配的旋翼参数估计方法,会因低PRF导致的相位混叠而无法得到准确的估计值。对于旋翼上的一个散射点而言,其在投影平面的位置变化如图2所示。可以发现,当使用低PRF时,散射点的位置将经历多个周期,并且每个周期的回波都是欠采样的。

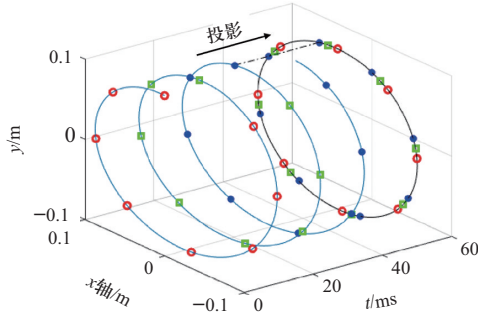


图2 观测时间内旋翼散射点的位置变化

Fig.2 The discrete position changes of the scattering point on rotor during the observing interval

具体而言,基于相位补偿项的桨叶长度估计可以表示为

$$x(\hat{l}) = \sum_{n=0}^{N-1} \sigma \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} l \cos(\omega_m n \Delta t_m - \theta_0)) \cdot \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \hat{l} \cos(\hat{\omega}_m n \Delta t_m - \hat{\theta}_0)), \hat{l} \in [0, L_0] \quad (17)$$

式中, $\Delta t_m = 1/\text{PRF}$ 。假设旋翼转速以及叶片初相角的估计都是准确的。当 $\hat{l}$ 与散射点在桨叶上的位置相匹配时, $x(\hat{l})$ 将会实现相参积累并形成峰值。因此,可以通过观察函数 $x(\hat{l})$ 的变化趋势实现桨叶长度的估计。理论上而言,对于任

意的 n ,使得 $x(\hat{l})$ 达到峰值的 $\hat{l}$ 满足以下相位表达式

$$(l - \hat{l}) \cos(\omega_m n \Delta t_m - \theta_0) = \frac{k\lambda}{2} \quad (18)$$

式中, $k \in \mathbb{Z}$ 。对于相邻的序号 $n+1$,可以得到类似的表达式

$$(l - \hat{l}) \cos(\omega_m (n+1) \Delta t_m - \theta_0) = \frac{k\lambda}{2} \quad (19)$$

上述两个集合的交集为

$$(l - \hat{l}) (\cos(\omega_m (n+1) \Delta t_m - \theta_0) - \cos(\omega_m n \Delta t_m - \theta_0)) = \frac{k\lambda}{2} \quad (20)$$

即

$$(l - \hat{l}) \sin(\frac{\omega_m (2n+1) \Delta t_m}{2} - \theta_0) = \frac{k\lambda}{4 \sin(\frac{\omega_m \Delta t_m}{2})} \quad (21)$$

图3进一步阐述了式(21)的物理意义,即极坐标下一系列等间隔平行直线,相邻直线之间的距离为 $\lambda/4 \sin(\omega_m \Delta t_m / 2)$ 。换句话说,当 $\hat{l}$ 的搜索方向与上述直线有交点时, $x(\hat{l})$ 将实现相参积累并达到峰值。因此,低PRF下 $x(\hat{l})$ 将会形成多个虚假峰(图3中绿点所示),导致常规的参数搜索类方法无法有效估计叶片长度 $\hat{l}$ 。

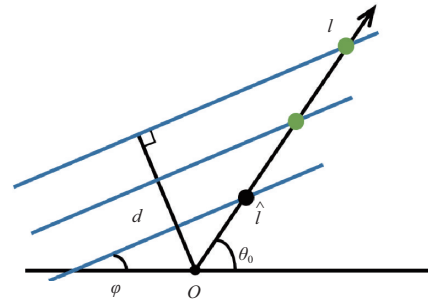


图3 极坐标系下的等相位线

Fig.3 The equal phase lines in the polar coordinate system

值得注意的是,由于桨叶的散射点模型在投影平面上的表现是稀疏的,低PRF下的桨叶长度估计可以进一步视为稀疏重构问题。受此启发,本节提出了一种基于OMP算法的高效桨叶长度估计方法。式(4)中的桨叶回波可以重写为矩阵形式

$$\mathbf{h}_m = \mathbf{S} \mathbf{D} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (22)$$

$$\mathbf{D} = [\mathbf{e}_{\sin}(t_m; \Delta l), \mathbf{e}_{\sin}(t_m; 2\Delta l), \dots, \mathbf{e}_{\sin}(t_m; M\Delta l)] \quad (23)$$

式中, $\mathbf{h}_m$ 为回波,即观测信号矢量; $\mathbf{S}$ 是随机降采样矩阵; $\mathbf{x}$ 为桨叶散射点分布函数,即待重建的散射点位置矢量; $\mathbf{n}$ 表示观测中的杂波和噪声矢量。 $\mathbf{D}$ 为用于实现稀疏重构的过完备字典矩阵,其各列由不同尺度 $\hat{l}$ 的相位补偿项组成。散射点的稀疏重构可以表示为

$$\min \|\mathbf{x}\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{h}_m - \mathbf{S} \mathbf{D} \mathbf{x}\|_2 < \epsilon \quad (24)$$

上述优化问题可以通过OMP算法进行求解,算法步骤如下:

(1)输入观测矢量 $\mathbf{h}_m$,字典 $\mathbf{D}$ 以及欠采样矩阵 $\mathbf{S}$ 。初始化残差项 $\mathbf{r}_0=\mathbf{h}_m$,投影矩阵 $\mathbf{F}_0=\mathbf{0}$,子空间索引集合 $\mathbf{A}_0=\emptyset$ 以及最大迭代次数 K 。令迭代次数 $t=1$ 。

(2)计算并挑选出与残差项相关度最高的变量,即计算 $\mathbf{d}_m=\arg\max_m |\langle \mathbf{r}_t, \mathbf{d}_m \rangle|$,并将 $\mathbf{d}_m$ 从字典中剔除;更新投影矩阵 $\mathbf{F}_t=\mathbf{F}_{t-1} \cup \mathbf{d}_m$ 以及索引集合 $\mathbf{A}_t=\mathbf{A}_{t-1} \cup m$ 。

(3)更新残差项 $\mathbf{r}_t=\mathbf{h}_m-\mathbf{F}_t(\mathbf{F}_t^H \mathbf{F}_t)^{-1} \mathbf{F}_t^H \mathbf{h}_m$,并令迭代次数 $t=t+1$ 。

(4)若 $t \geq K$ 或 $\|\mathbf{r}_t\| < \varepsilon_0$,进行步骤(5);否则返回步骤(2)。

(5)重构 $\mathbf{x}$ 的稀疏表示 $\mathbf{x}=\mathbf{F}_t(\mathbf{F}_t^H \mathbf{F}_t)^{-1} \mathbf{F}_t^H \mathbf{h}_m$ 以及对应位置信息 $\mathbf{A}_t$ 。

K 和 ε_0 是上述算法的两个关键参数。其中, K 与场景的稀疏度有关,可以通过目标先验信息以及雷达辐射波长进行估计;能量阈值 ε_0 与噪声水平有关,可以通过投影面内不包含桨叶的区域计算得到。借助OMP算法,可以有效恢复散射点无混叠的分布参数,进而实现在回波方位向欠采样条件下叶片长度的准确估计。

3 试验验证与性能分析

3.1 仿真数据试验结果

基于ISAR的目标微动部分参数提取一般需要补偿目标刚体部分的运动,无人机目标的尺寸往往较小,其刚体部分的回波在补偿后表现为多普勒频域的窄带信号,可以通过滤波的方式进行滤除。现阶段,ISAR研究中针对刚体部分的运动补偿方法已经较为成熟,因此,为了简便起见,使用简单的旋翼模型完成对所提方法的试验验证。图4(a)展示了仿真旋翼散射点模型,其中红色矩形框表示桨叶散射点,蓝色圆圈表示旋翼转轴。旋翼的桨叶长度为0.06 m,转速为 $\omega_m=2\pi \times 60$ rad/s。因此,根据式(5)可知,目标的最大多普勒频率为11.6 kHz,因此,不发生混叠的PRF应当大于 $\text{PRF}_r=23.2$ kHz。仿真试验中,雷达发射线性调频连续波信号,载波频率为77 GHz,带宽为3.6 GHz,PRF为17.5 kHz。图4(b)展示了旋翼所在距离单元的仿真回波信号,可以发现,旋翼的转动使得信号幅度呈现出明显的周期变化。

图5展示了10 dB信噪比、不同PRF下,自相关法和JEM法的旋翼转速估计结果。可以发现,信噪比足够时,自相关法的估计性能总体上是稳健的;而对于JEM方法,其用

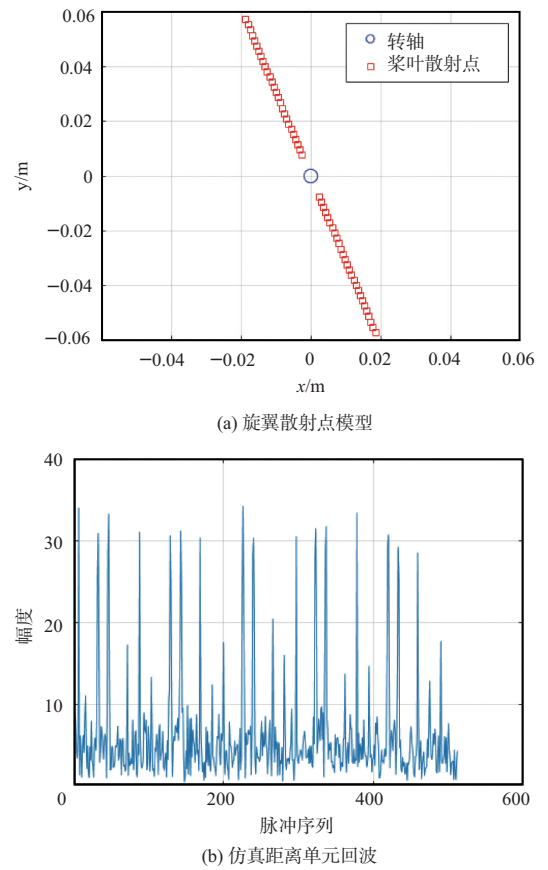


图4 仿真旋翼模型及其回波

Fig.4 The simulated rotor model and the echoes

于转速估计的周期谱线在欠采样较为严重时已无法分辨。

以下试验验证了桨叶初相角估计的有效性。如前文所述,由于目标桨叶的个数往往是未知的,旋翼转速的估计值将会有多个可能的结果。图6(a)和图6(b)分别展示了双桨叶和三桨叶假设下的 θ_0 估计结果。可以发现,当使用正确的转速时,曲线规律性明显且峰值个数与桨叶个数假设一致;而使用不正确的转速时,其结果类似于噪声。简言之,本文所提方法不仅可以实现初相角 θ_0 的解耦估计,同时可以用于反馈确定旋翼转速与桨叶个数。

为了进一步说明本文所提方法在低PRF下的有效性,选取了两种较为常用的微多普勒特征提取方法进行对比,包括时频分析类方法中的短时傅里叶变换法(STFT)以及参考文献[16]中提出的一种参数化的方法(简称PA法)。三种方法在200%PRF_r、75%PRF_r和50%PRF_r的结果对比如图7所示。对于STFT,可以通过时频谱图的周期性提取旋翼的转速。但值得注意的是,旋翼回波在多普勒域的幅度是由各阶贝塞尔函数系数相乘、卷积等操作得来,计算过程复杂。多次仿真试验表明,其在高频处的幅度可能很小,即很难准确

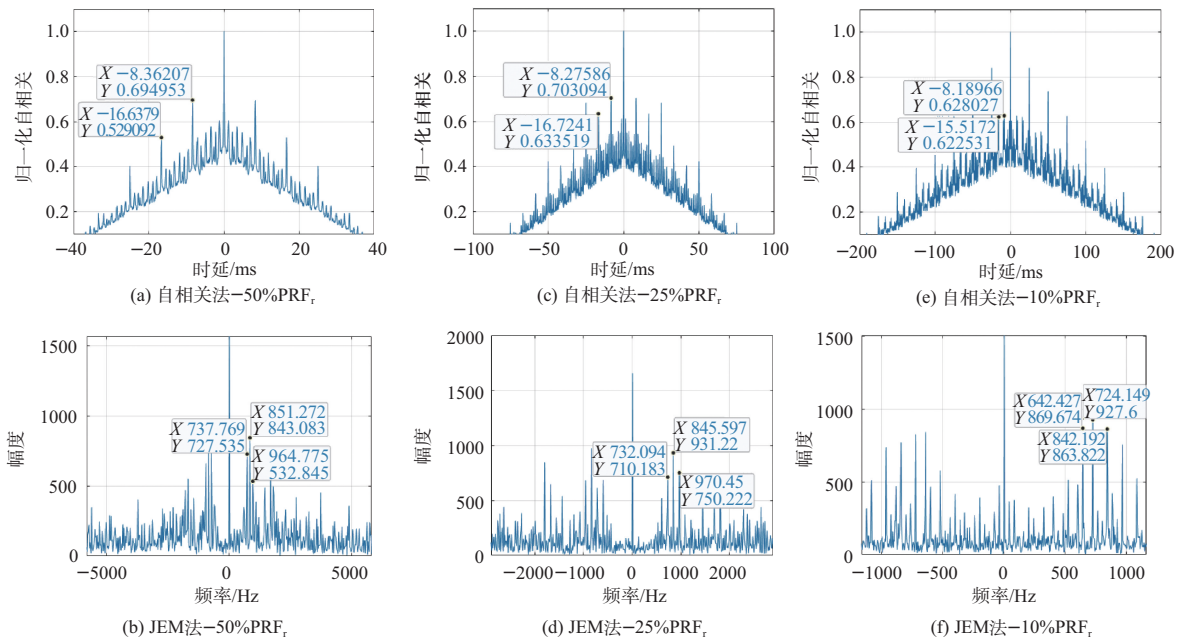
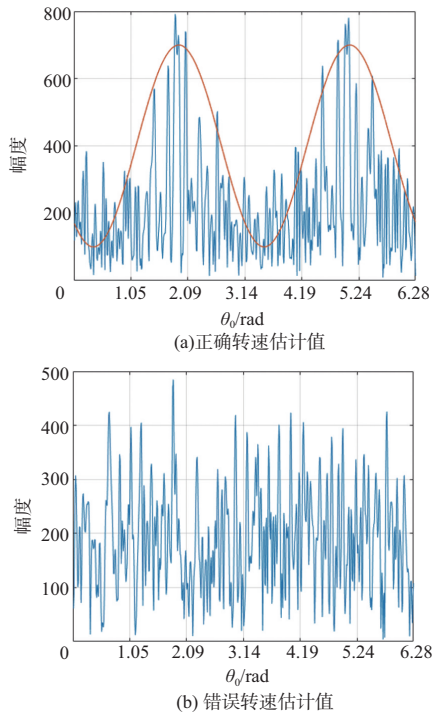


图5 不同PRF下的转速估计结果

Fig.5 The results of rotation speed estimation under different PRF

图6 不同转速下的 θ_0 估计结果Fig.6 The estimation results of θ_0 under different rotation speed estimates

判断信号的带宽范围,因此无论是否处于低PRF条件下,都很难通过多普勒带宽信息进行桨叶长度的估计。PA方法作为一种遍历搜索方法,需要建立回波在参数空间内的映射,

但低PRF导致的相位混叠会影响在桨叶长度方向的相参积累结果,导致无法争取提取桨叶长度信息;此外,相参积累也会导致在参数空间内出现带状异常结果,影响判断。本文提出的方法能在不同PRF下保持稳健的性能,成功实现桨叶初相角的准确估计,完成桨叶散射点的稀疏重构。此外,本文也对比了上述三种方法的运行时间。输入回波信号的长度为 1×512 ,参数空间的大小为 628×200 ;对上述算法进行1000次重复试验,结果见表1。可以发现,相比于遍历搜索方法,本文提出的参数解耦方法明显缩短了运行耗时,而该方法在面对大规模数据时将更为有效。

3.2 实测数据试验结果

在外场环境下,使用大疆mini-2无人机作为观测目标。作为一款常见的消费级无人机,mini-2的尺寸较小,其旋翼直径约为0.12 m。此外,使用AWR2243毫米波雷达开发套件实现对无人机的观测,作为一款成熟的货架产品,该雷达造价低廉、性能稳定,在无人机探测中具有巨大的应用潜力。试验中,雷达采用调频连续波体制,工作于77 GHz频段,发射信号有效带宽为2.4 GHz,重复频率为10 kHz,由此可以推算,其距离分辨率约为0.0625 m,旋翼回波约占两个距离单元。试验中使用的无人机和雷达如图8所示。

本文重点关注目标旋翼微多普勒特征的提取,而基于传统ISAR技术的机身成像研究已较为成熟,因此,在实测场景下,操控无人机处于悬停状态,以避免机身运动的影

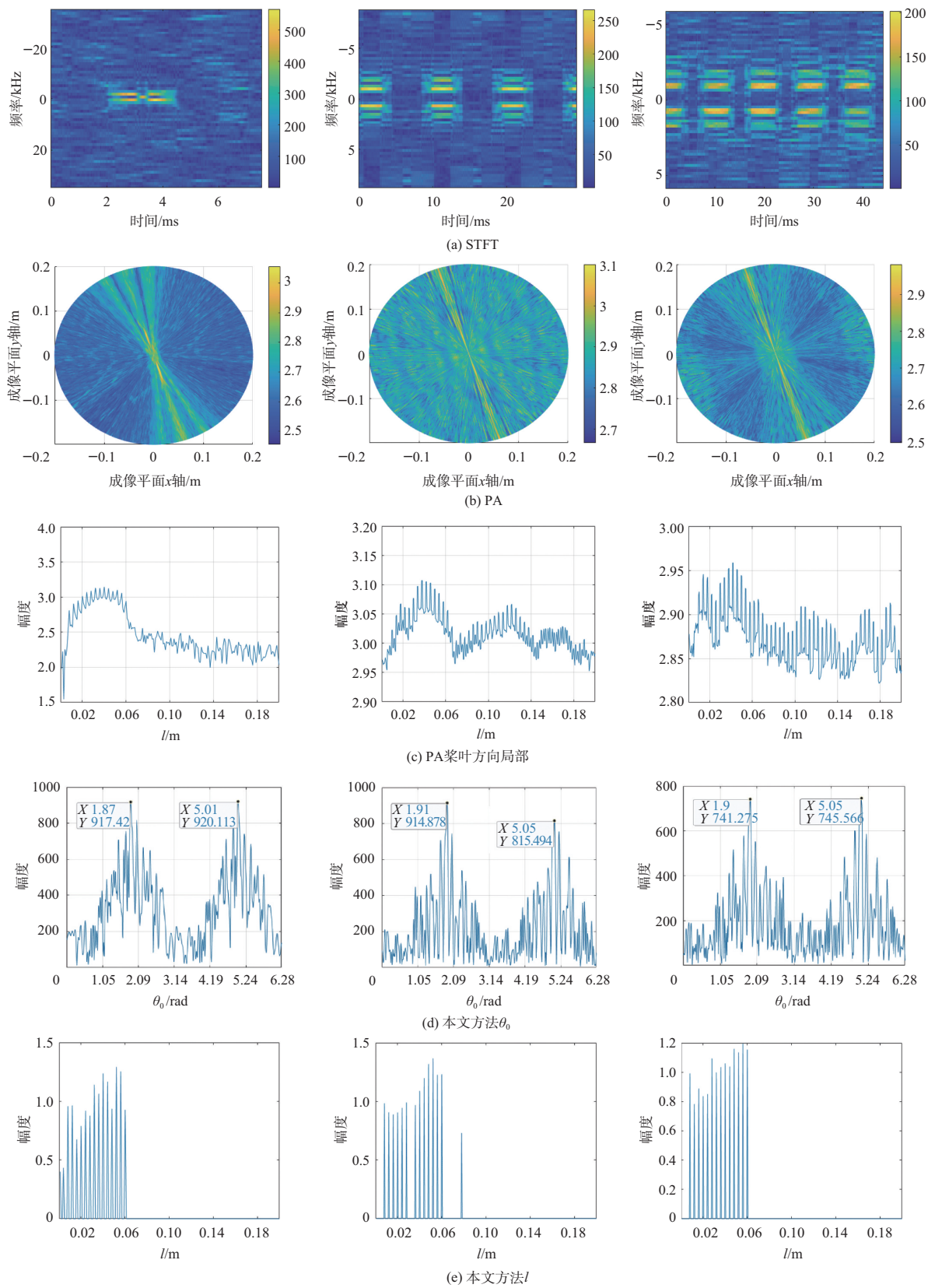


图7 各算法结果对比(自左而右200%PRF,75%PRF,50%PRF)

Fig.7 Comparison between algorithm results (left-right 200%PRF, 75%PRF, 50%PRF)

表1 运行时间对比

Table 1 The comparison of running time

算法名称	STFT	PA	本文方法
平均运行时间/s	0.33	17.51	3.23

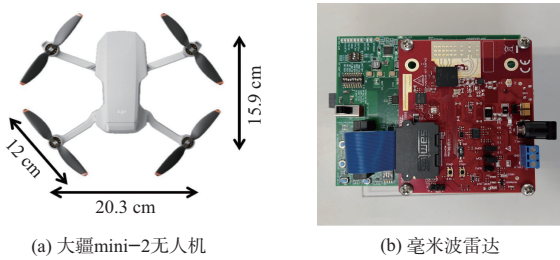


图8 试验所用无人机与雷达

Fig.8 The drone and radar used in the experiment

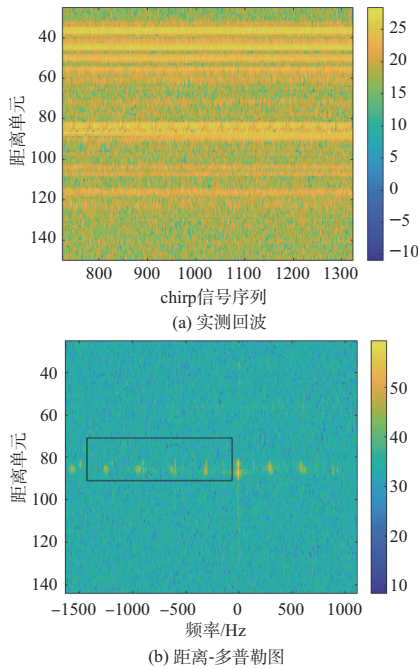


图9 无人机雷达回波实测数据

Fig.9 The measured echoes of the drone

响。图9展示了目标回波及其距离-多普勒图像,可以发现,在第82~85距离单元处有明显的旋翼线谱,对应距离向长度约为0.24 m,与无人机的尺寸一致。

选取第82距离单元进行旋翼微动特征分析。图10展示了基于自相关和JEM分析的旋翼转速估计结果,从中可以计算得到实测无人机的旋翼转速约为 $\omega_m = 2\pi \times 149$ rad/s,与该型号无人机的技术参数基本一致。

为了剔除静止杂波以及悬停机身的回波影响,对零多普勒频率附近的回波信号分量进行了滤波处理。图11展示了三种方法基于实测数据的旋翼参数估计结果对比,其结果与仿真试验基本一致。对于STFT方法,其结果表现出

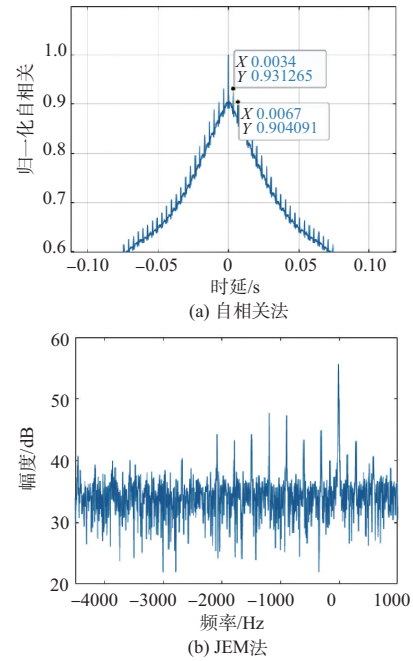


图10 实测数据旋翼转速估计结果

Fig.10 Rotor speed estimation results of measured data

明显的周期性,转速估计约为 $2\pi \times 150.45$ rad/s;但其时频谱图的最大谱宽约为5 kHz,进而推算出的桨叶长度约为0.01 m,严重偏离实际值。而对于PA方法,仅能从参数空间映射结果中确定存在两个桨叶,但无法通过在长度方向上的幅度变化趋势判断桨叶长度。本文提出的方法则能够准确估计桨叶个数,并且重建桨叶方向的稀疏散射点模型,桨叶长度估计结果约为0.05 m。同时,比较了上述三种方法的运行时间,结果见表2。实测试验中,输入数据的长度为 1×2048 ,参数空间尺寸为 628×150 。可以发现,当输入信号长度增加时,PA方法的搜索计算耗时明显增加,而本文所提方法仍保持着较高的计算效率。

4 结论

针对空中旋翼目标的ISAR观测问题,本文提出了一种分层式的微动参数估计方法,将传统的三维参数搜索简化为三个一维优化问题,实现参数解耦。该方法利用自相关函数和JEM特性估计转速,通过相位补偿项得到桨叶初始相位角,利用稀疏重建方法恢复旋翼的散射点分布。与现有方法相比,该方法具有计算复杂度低、运行时间短等优点。更重要的是,该分层式方法能够在回波方位向非均匀采样的情况下实现准确参数估计。仿真和实测数据试验表明,该方法的旋翼参数估计精度高,运行时间仅为传统遍历算法的10%左右。

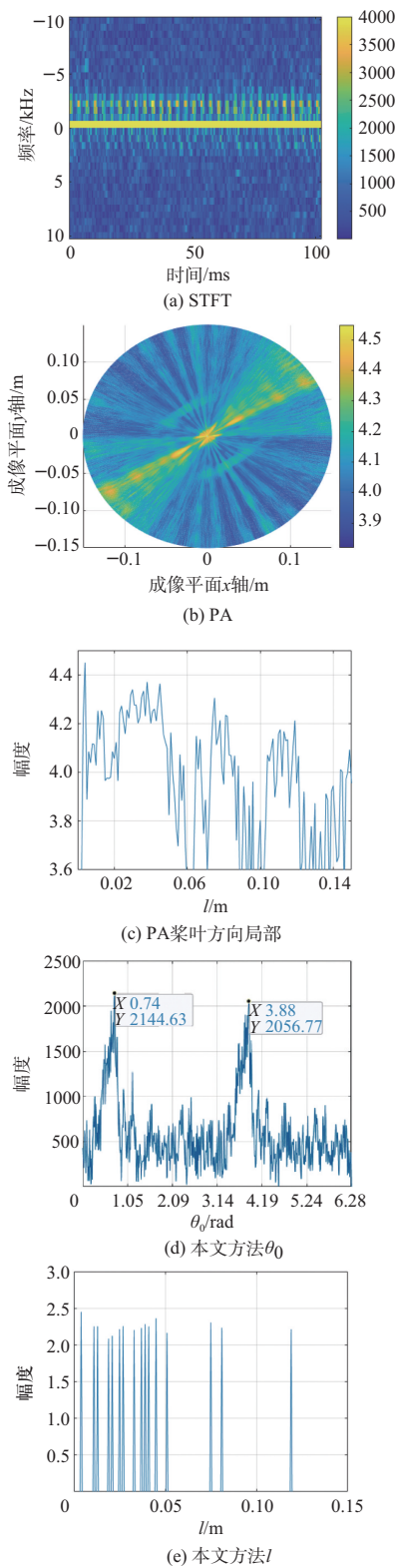


图11 三种方法实测数据结果对比

Fig.11 The comparison of the estimation results of measured data

表2 实测数据运行时间对比

Table 2 The comparison of running time using measured data

算法名称	STFT	PA	本文方法
平均运行时间/s	0.83	130.42	9.46

参考文献

- [1] Yousaf J, Zia H, Alhalabi M, et al. Drone and controller detection and localization: Trends and challenges[J]. Applied Sciences, 2022, 12(24): 12612.
- [2] 郭彪,孔小林,孙寒晓,等. 直升机雷达特性模拟方法研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(7): 57-61.
Guo Biao, Kong Xiaolin, Sun Hanxiao, et al. RCS simulation method research for Helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(7): 57-61. (in Chinese)
- [3] 赵亮亮, 胡楚锋, 李建周, 等. 飞行动目标角闪烁建模计算研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(9): 68-74.
Zhao Liangliang, Hu Chufeng, Li Jianzhou, et al. Research on angle glint modeling of flying target[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 68-74. (in Chinese)
- [4] Zhang Rui, Li Gang, Zhang Yiming. Micro-Doppler interference removal via histogram analysis in time-frequency domain [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(2): 755-768.
- [5] Wang Shibin, Chen Xuefeng, Tong Chaowei, et al. Matching synchrosqueezing wavelet transform and application to aeroengine vibration monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 66(2): 360-372.
- [6] Andi H, Pascale S, Bhashyam B, et al. Fundamental Frequency Estimation of HERM Lines of Drones[C]. IEEE International Radar Conference, 2020: 1013-1018.
- [7] Wu Kun, Wang Xiangrong, Liu Hengfeng, et al. Parameter estimation of rotary drones in far distance using long-time spectral processing[J]. 2023 IEEE International Radar Conference (RADAR), 2023: 1-6.
- [8] Ahmad B I, Grey J, Newman M, et al. Low-latency convolution neural network for estimating drone physical parameters with radar[C]. International Conference on Radar Systems (RADAR 2022), 2022: 1-6.
- [9] Bell M R, Grubbs R A. JEM modeling and measurement for radar target identification[J]. IEEE Transactions on Aerospace

- and Electronic Systems, 1993, 29(1): 73-87.
- [10] Lee T, Park J, Yang W, et al. A fast sequential MLE algorithm for jet engine classification with radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(23): 14157-14165.
- [11] Gong Jiangkun, Yan Jun, Li Deren, et al. Low detectable JEM signals in radar echoes from a helicopter with composite blades [C]. 2022 23rd International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2022: 235-240.
- [12] Hansen K V, Toft P A. Fast curve estimation using preconditioned generalized Radon transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(12): 1651-1661.
- [13] Katsevich A I. Local tomography for the generalized Radon transform[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1997, 57(4): 1128-1162.
- [14] Wang Qi, Xing Mengdao, Lu Guangyue, et al. High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 46(1): 22-30.
- [15] Bai Xueru, Zhou Feng, Xing Mengdao, et al. High resolution ISAR imaging of targets with rotating parts[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2530-2543.
- [16] Ji Guangyu, Song Chen, Huo Hongtao. Detection and identification of low-slow-small rotor unmanned aerial vehicle using micro-Doppler information[J]. IEEE Access, 2021, 9: 99995-100008.

Multi-stage Parameter Estimation Method for the Micro-Doppler of Rotor Targets Using ISAR

Xu Zhiyong¹, Tian Sirui¹, Xu Keqin², Chen Chen¹

1. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*

2. *Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China*

Abstract: In the research on inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging of the target with propeller, it is of great significance to analyze the micro-Doppler characteristics so as to extract the physical parameters of the propeller. In this paper, a hierarchical estimation method of the micro-Doppler parameters is proposed, which simplifies the traditional three-dimensional parameter search into three one-dimensional optimization problems, and realizes the decoupling of the rotation speed, blade initial phase angle and blade length. Compared with the existing methods, the proposed method has the advantages of low computational complexity and short running time, and can achieve accurate estimation of rotor parameters under azimuth undersampling conditions. The experiments using simulated and measured data show that the proposed method has high precision of rotor parameter estimation, and the running time is only about 10% of the traditional traversal algorithm. This paper provides an efficient solution for the micro-motion characteristic analysis on propeller targets, which effectively reduces the hardware requirements of data acquisition and processing.

Key Words: ISAR; rotor targets; micro-Doppler features; parameter estimation; parameter decoupling

Received: 2024-12-25; **Revised:** 2025-03-17; **Accepted:** 2025-04-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20220013059001)