

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107972

# 阵列雷达鸟类回波信号精细建模与特征分析\*

何炜琨, 张鑫蕴, 王晓亮, 柳振明

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室 天津 300300)

**摘要:**全国机场接连出现无人机“黑飞”扰航事件,而飞鸟成为无人机目标探测和识别的主要干扰,对其回波特性进行有效分析具有重要意义。提出了一种考虑鸟类实际电磁散射特性的回波信号精细建模方法。利用多层快速多极子算法计算3种典型扑翼姿态下的鸟类雷达散射截面积(RCS),根据鸟类目标运动特性设置扑翼姿态变化,与阵列天线鸟类回波信号模型相结合,实现任意观测点各通道鸟类回波信号的精细建模。实验结果表明,鸟类目标RCS因观测角度不同会有较大差异,侧方RCS值较前方和后方更大。考虑鸟类目标电磁散射特性的回波信号精细建模能够实现鸟类目标的精细化描述,所提方法为研究鸟类目标回波特性提供了参考。

**关键词:**阵列雷达;鸟类回波;电磁散射特性;精细建模;特征分析

中图分类号:TN955 TH-39 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:510.40

## Refined modeling and feature analysis of birds echoes for array radar

He Weikun, Zhang Xinyun, Wang Xiaoliang, Liu Zhenming

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The “black flying” incidents of unmanned aerial vehicles (UAVs) in airports have frequently happened across the country. As the main interference for the detection and identification of UAVs, the characteristics analysis for the echoes of flying birds is of great significance. A fined modeling method of bird echoes is proposed, which considers the actual electromagnetic scattering characteristics. The multi-layer fast multipole method is used to calculate the radar cross section (RCS) of birds in three typical flapping wing attitudes. The flapping wing attitude is calculated and combined with the signal propagation model for the array antenna. Then, the fined modeling of the bird echoes for each channel at any observation point is realized. Experimental results show that the RCS of birds varies greatly with different observation angles. The RCS value corresponding to the side irradiation is higher than that corresponding to the front and back irradiation. The fine modeling of bird echoes can demonstrate the fine description for the bird targets, which can provide the reference to study the echoes of birds.

**Keywords:** array radar; bird echoes; electromagnetic scattering characteristics; fined modeling; feature analysis

## 0 引言

无人机给生活带来便利的同时也带来了各种威胁和隐患,全国机场接连出现的无人机“黑飞”扰航事件逐渐成为焦点问题<sup>[1]</sup>。无人机黑飞等违规行为不仅可能干扰正常飞行,还可能造成航班延误,甚至导致飞行事故,给人民生命和国家安全造成严重损害<sup>[2-3]</sup>,迫切需要有效手段对其进行探测。鸟类目标运动模式及雷达散射截面

(radar cross section, RCS)与无人机具有一定的相似性,是无人机探测的主要干扰<sup>[4-7]</sup>,因此鸟类目标的有效识别对于无人机探测至关重要。鸟类回波会随其种类、运动姿态以及雷达工作模式的变化而变化,实测数据覆盖鸟的种类及运动状态有限,且实际观测时相关参数不易控制。鸟类目标雷达回波精细建模能够为其探测与辨识提供相应理论基础和数据来源,同时建模精度对于鸟类目标辨识在一定程度上会有所影响。

近年来国内外学者在鸟类回波仿真及电磁散射特性

收稿日期:2021-05-21 Received Date: 2021-05-21

\* 基金项目:国家自然科学基金委员会与民航局联合资助项目(U1533110)、天津市自然科学基金项目(19JCQNJC01000)资助

分析方面均开展了一些研究。2014 年, Torvik 等<sup>[8]</sup>建立了鳶鸟的三维模型, 利用时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 方法仿真了翅膀处于上仰、中停和下伏 3 种典型姿态下的雷达散射截面, 探究了鸟类振翅运动对回波调制特性的影响; 刘凯越等<sup>[9]</sup>建立了天鹅 3 种不同扑翼姿态的 CAD 模型, 利用矩量法计算每种姿态下的 RCS, 进而结合飞行航迹得到鸟类目标动态 RCS。上述电磁计算方法中, FDTD 随工作频率增加运算时长增长, 鳶鸟在某一个角度下的 RCS 计算时间长达 2 个小时, 矩量法虽是电磁分析的经典算法, 适用于任何形状的电磁散射计算问题, 但存储量和计算量偏大。

鸟类运动为非刚体运动, Chen<sup>[10]</sup>根据鸟类运动学模型<sup>[11]</sup>, 将鸟类等效为几个刚体部件, 仿真了鸟类运动回波, 但模型中的 RCS 计算是将几个刚体部件等效为椭球, 因此不能准确反映目标回波特性。Hu 等<sup>[12]</sup>提出了鸟扑翼运动模型与其电磁散射模型相结合的建模方法, 但没有考虑飞行过程中鸟类位置变化所导致的方位角、俯仰角变化对回波的影响。

上述鸟类回波建模方法主要针对单天线体制雷达。目前, 阵列雷达应用越来越广泛, 其易于实现窄波束、低副瓣和相控波束扫描, 能使发现目标和跟踪目标的可靠性、稳定性和实时性得到提高, 在低空目标的探测和监视方面发挥着极其重要的作用<sup>[13]</sup>。本文首先从电磁波传输角度对阵列雷达鸟类回波进行了建模, 在此基础上结合鸟类目标飞行过程中 RCS 的变化, 构建阵列雷达各通道鸟类目标回波的精细化模型, 分析鸟类目标不同姿态对 RCS 的影响, 并从时频谱角度对回波进行微动特征分析, 验证所建立模型的准确性。

## 1 阵列雷达鸟类回波模型

### 1.1 鸟类扑翼运动模型

鸟类扑翼运动是一种典型的非刚体运动, 研究鸟类扑翼运动首先需要了解鸟类翅膀的结构。鸟类翅膀与人的上肢结构类似, 有 3 个关节, 分别是肩关节、肘关节和腕关节。肩关节和肘关节之间的部分称为上臂, 而肘关节和腕关节之间的部分称为前臂<sup>[11]</sup>。

鸟类扑翼运动模型<sup>[10]</sup>在鸟类回波仿真中广泛应用, 该模型假设鸟类翅膀由两个关节连接的刚体模型构成, 其运动主要通过上臂和前臂的上下摆动以及前臂的前后摇摆完成, 对应的运动模型如图 1 所示。

图 1 中  $\psi_1$  为上臂扑打角度,  $\psi_2$  为前臂扑打角度,  $\phi_2$  为前臂扭转角即翅膀前后摇摆角度。由关节连接的刚体可用正余弦函数来表示其运动形式, 因此上臂扑打角度可以写为<sup>[10]</sup>:

$$\psi_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_{flap} t) + \psi_{10} \quad (1)$$

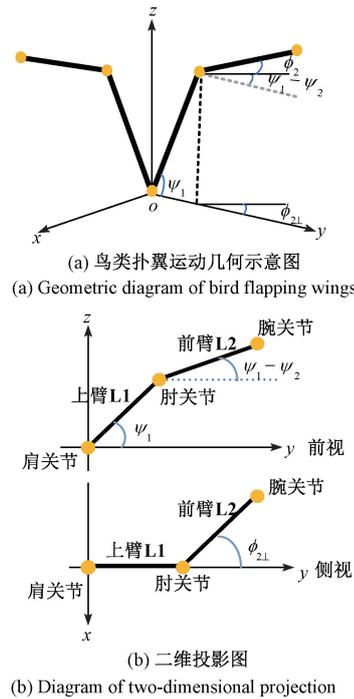


图 1 鸟类扑翼运动模型<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Flapping wing movement model of birds<sup>[10]</sup>

其中,  $A_1$  为上臂扑打角幅度,  $\psi_{10}$  为上臂扑打角滞后,  $f_{flap}$  为振动频率。

同理, 前臂扑打角度可表示为<sup>[10]</sup>:

$$\psi_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_{flap} t) + \psi_{20} \quad (2)$$

其中,  $A_2$  为前臂扑打角幅度,  $\psi_{20}$  为前臂扑打角滞后。

依据图 1 所示的扑翼运动几何示意图, 前臂扭转角度为<sup>[10]</sup>:

$$\phi_2(t) = C_2 \cos(2\pi f_{flap} t) + \phi_{20} \quad (3)$$

其中,  $C_2$  为前臂扭转角幅度,  $\phi_{20}$  为前臂扭转角滞后。由图 1 可以看出, 前臂扭转角在  $xy$  平面上的投影  $\phi_{2\perp}(t)$  可进一步写为<sup>[10]</sup>:

$$\phi_{2\perp}(t) = \frac{\phi_2(t)}{\cos[\psi_1(t) - \psi_2(t)]} \quad (4)$$

在上述鸟翼运动模型中, 肘关节位置会随上臂的摆动而变化, 设上臂长度为  $L_1$ , 在某一特定时刻  $t$  肘关节位置为  $P_1(x_1(t), y_1(t), z_1(t))$ , 则<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} x_1(t) = 0 \\ y_1(t) = L_1 \cos \psi_1(t) \\ z_1(t) = L_1 \sin \psi_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

同理, 腕关节位置也会随前臂的摆动而变化, 设前臂长度为  $L_2$ , 在某一特定时刻  $t$  腕关节位置为  $P_2(x_2(t), y_2(t), z_2(t))$ , 则<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} x_2(t) = -[y_2(t) - y_1(t)] \cdot \tan(\phi_{2\perp}(t)) \\ y_2(t) = L_1 \cos\psi_1(t) + L_2 \cos\phi_2(t) \cdot \\ \quad \cos[\psi_1(t) - \psi_2(t)] \\ z_2(t) = L_1 \sin\psi_1(t) + L_2 \cos\phi_2(t) \cdot \\ \quad \sin[\psi_1(t) - \psi_2(t)] \end{cases} \quad (6)$$

## 1.2 阵列雷达回波模型

雷达位于坐标原点  $O$ , 雷达坐标系为  $XYZ$ , 鸟类坐标系为  $xyz$ 。为方便分析, 以鸟类目标沿  $ox$  方向运动为例,  $ox$  轴方向与雷达坐标系  $OX$  轴方向相反,  $oz$  轴方向与雷达坐标系  $OZ$  轴方向相同,  $oy$  轴与  $OY$  轴方向根据右手法则确定。雷达天线阵列为沿  $OX$  轴方向的线阵, 鸟类目标与雷达几何位置关系如图 2 所示。

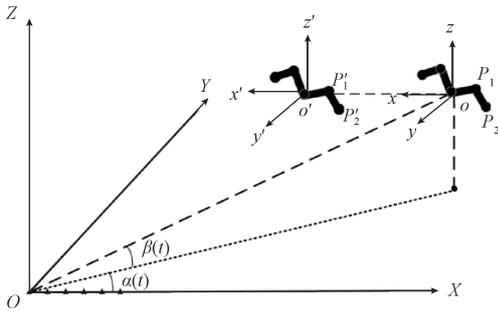


图 2 鸟类与雷达几何关系

Fig. 2 Geometric relationship between birds and radar

鸟类初始时刻位于点  $o(x_0, y_0, z_0)$  处, 此时目标到雷达距离为  $R_0$ , 方位角为  $\alpha$ , 俯仰角为  $\beta$ , 鸟类目标以速度  $v$  运动,  $t$  时刻鸟类目标位置为  $o'(x_0 - vt, y_0, z_0)$ , 目标到雷达距离  $R_0' = \sqrt{(x_0 - vt)^2 + y_0^2 + z_0^2}$ , 方位角  $\alpha' = (x_0 - vt) / \sqrt{(x_0 - vt)^2 + y_0^2}$ , 俯仰角  $\beta' = z_0 / \sqrt{(x_0 - vt)^2 + y_0^2 + z_0^2}$ 。

鸟类回波是将几个关节和鸟身作为强散射点分别计算回波再叠加, 考虑鸟类目标翅膀回波由其翅膀上的 4 个主要关节点 (左肘关节、右肘关节、左腕关节以及右腕关节) 组成, 依据图 2 中雷达与目标几何位置关系图, 下面分别给出 4 个主要关节点到雷达的距离。设左肘关节到雷达距离为  $R_1(t)$ , 则:

$$R_1(t) = \|Oo + oo' + o'P_1'\| = \{(x_0 - vt)^2 + (y_0 - y_1(t))^2 + (z_0 + z_1(t))^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中,  $Oo$  为两坐标系之间的距离,  $oo'$  为鸟类向前平飞的距离,  $o'P_1'$  为肘关节散射点到鸟体的距离,  $o'P_1' = (x_1(t), y_1(t), z_1(t))$ , 依据肘关节运动特性 (如式(5)所示), 式(7)可化简为:

$$R_1(t) \approx R_0' - L_1 \cos\beta' \sin\alpha' \cdot \cos\psi_1(t) + L_1 \sin\beta' \cdot \sin\psi_1(t) \quad (8)$$

同理右肘关节到雷达距离为:

$$R_1'(t) \approx R_0' + L_1 \cos\beta' \sin\alpha' \cdot \cos\psi_1(t) +$$

$$L_1 \sin\beta' \cdot \sin\psi_1(t) \quad (9)$$

左腕关节到雷达距离为  $R_2(t)$ , 则:

$$R_2(t) = \|Oo + oo' + o'P_2'\| = \{(x_0 - vt + x_2(t))^2 + (y_0 - y_2(t))^2 + (z_0 + z_2(t))^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中,  $o'P_2'$  为腕关节散射点到鸟体的距离,  $o'P_2' = (x_2(t), y_2(t), z_2(t))$ , 依据腕关节运动特性 (如式(6)所示), 则式(10)可进一步化简为:

$$R_2(t) \approx R_0' + L_1 (\sin\psi_1(t) \cdot \sin\beta' - \cos\psi_1(t) \cdot \cos\beta' \sin\alpha') + L_2 \cos\phi_2(t) \cdot \{\sin[\psi_1(t) - \psi_2(t)] \cdot \sin\beta' - \cos[\psi_1(t) - \psi_2(t)] (\cos\beta' \sin\alpha' + \tan(\phi_{2\perp}(t)))\} \approx R_1(t) + L_2 \cos\phi_2(t) \cdot \{\sin[\psi_1(t) - \psi_2(t)] \cdot \sin\beta' - \cos[\psi_1(t) - \psi_2(t)] (\cos\beta' \sin\alpha' + \tan(\phi_{2\perp}(t)))\} \quad (11)$$

同理右腕关节到雷达距离为:

$$R_2'(t) \approx R_1'(t) + L_2 \cos\phi_2(t) \cdot \{\sin[\psi_1(t) - \psi_2(t)] \cdot \sin\beta' + \cos[\psi_1(t) - \psi_2(t)] (\cos\beta' \sin\alpha' - \tan(\phi_{2\perp}(t)))\} \quad (12)$$

在实际应用中, 已知鸟类上臂与前臂长度、上臂与前臂扑打角度、前臂扭转角度及鸟类目标的位置即可确定鸟类各散射点到雷达的距离。鸟类目标与雷达距离关系确定后, 依据阵列雷达回波模型, 从电磁波传输角度对阵列雷达鸟类回波进行建模。

假设雷达发射信号为线性调频信号, 发射信号  $\tilde{s}(t)$  可写为<sup>[14]</sup>:

$$\tilde{s}(t) = u(t) \exp(j2\pi f_0 t) \exp(j\psi) \quad (13)$$

其中,  $f_0$  为载波频率;  $\psi$  为雷达发射信号的随机相位;  $u(t)$  为脉冲串信号的复包络:  $u(t) = \sum_{k=1}^K u_p(t - (k-1)T_r)$ ,  $T_r$  为脉冲重复周期,  $K$  为脉冲数,  $u_p(t)$  表示单个线性调频信号的复包络, 即  $u_p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \exp\left(j\frac{\mu t^2}{2}\right)$ ,  $T$  为脉冲宽度;  $\mu = 2\pi B/T$ ,  $B$  为带宽,  $\text{rect}(t/T)$  为矩形窗函数。

假设入射信号满足窄带条件, 对于均匀线阵接收信号, 第  $l$  个阵元接收到第  $i$  个散射点的回波信号表示为<sup>[14]</sup>:

$$\tilde{S}_i(t) = u(t - \tau_i - \tau_{li}) \exp(j\psi) \cdot \exp[j2\pi(f_0 + f_d) \cdot (t - \tau_i - \tau_{li})] \quad (14)$$

其中,  $f_d$  为由于目标平动产生的多普勒频移,  $f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos\alpha' \cos\beta'$ ,  $\alpha'$  和  $\beta'$  为目标的方位角和俯仰角;  $\tau_i$  为由路径产生的延时,  $\tau_i \approx \frac{2r_i(t)}{c}$ ,  $r_i(t)$  为散射点到雷达距

离;  $\tau_{li}$  为第  $l$  个阵元相对于参考阵元的延时,  $\tau_{li} = \frac{1}{c} [(l-1)d \sin \theta_i]$ ,  $\theta_i$  为信号入射方向与法线夹角,  $d$  为阵元间隔。由于发射信号为窄带信号, 回波信号包络在阵元间保持恒定, 式(14) 可进一步化简写为<sup>[14]</sup>:

$$\tilde{S}_l(t) = u(t - \tau_i) \exp(j\psi) \cdot \exp(j2\pi f_d t) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi r_i(t)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(l-1)d \sin \theta_i}{\lambda}\right\} \cdot \exp(j2\pi f_0 t) \quad (15)$$

其中,  $j2\pi f_d \tau_i$ 、 $j2\pi f_d \tau_{li}$  被吸收进随机相位项。之后对回波信号去载波, 得到第  $l$  个阵元基带信号<sup>[14]</sup>:

$$S_l(t) = u(t - \tau_i) \exp(j\psi) \cdot \exp(j2\pi f_d t) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi r_i(t)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(l-1)d \sin \theta_i}{\lambda}\right\} \quad (16)$$

假设鸟类由  $N(N=5)$  个散射点组成, 则第  $l$  个阵元接收到目标的回波信号为<sup>[14]</sup>:

$$S_l(t) = \sum_{i=1}^N u(t - \tau_i) \exp(j\psi) \cdot \exp(j2\pi f_d t) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi r_i(t)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(l-1)d \sin \theta_i}{\lambda}\right\} \quad (17)$$

式中:  $r_i(t)$  为散射点到雷达距离, 其中鸟体中心到雷达距离  $r_1(t) = R_0'$ , 鸟的左右翅膀肘关节到雷达距离  $r_2(t) = R_1(t)$ ,  $r_3(t) = R'_1(t)$ , 鸟的左右翅膀腕关节到雷达距离  $r_4(t) = R_2(t)$ ,  $r_5(t) = R'_2(t)$ 。

采用匹配滤波器  $h(t) = Ku_p^*(-t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(-j\mu t^2/2)$ , ( $|t| \leq T/2$ ,  $K$  为常数) 对接收到的回波进行匹配滤波处理, 经脉冲压缩得到第  $l$  个阵元接收到的第  $k$  个脉冲所对应的回波信号:

$$S_{l,k}(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^N T \cdot Sa[\pi B(\hat{t} - \tau_i)] \exp(j\psi) \cdot \exp(j2\pi f_d t_m) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi r_i(t_m)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(l-1)d \sin \theta_i}{\lambda}\right\} \quad (18)$$

其中,  $t_m$  为慢时间,  $\hat{t}$  为快时间。对于不同种类的鸟, 改变其自身运动特性的相关参数, 如振翅频率、飞行速度、扑打角度、臂长等, 得到其对应的雷达回波。

## 2 鸟类目标电磁散射特性分析

扑翼飞行是自然界中几乎所有生物采用的最普遍的飞行模式, 其主要利用翼面扑动产生的升力和推力来实现, 是鸟类目标所特有的<sup>[9]</sup>。基于鸟类扑翼模式, 建立了鸟类(麻雀)翅膀处于不同位置的3种典型扑翼姿态(分别为上扑翼、平扑翼、下扑翼)的三维模型, 如图3所示。



图3 3种扑翼姿态模型

Fig. 3 Three typical flapping wing attitudes

鸟类进行建模过程中, 通过对曲面的旋转、拉伸尽可能逼真鸟类形状, 将三维扑翼姿态模型存储为 IGES 格式导入电磁计算工具中。对模型进行工作频率、激励、介质材料等参数设置并进行网格剖分, 在此基础上, 选择相应电磁计算方法进行电磁计算。

常用的电磁计算求解方法主要有矩量法、多层快速多极子法、时域有限差分法、有限元法和高频近似法。高频近似法属于估算, 计算精度往往受限, 有限元方法计算速度慢, 时域有限差分若采用较小步长, 计算模拟所需时间变长, 矩量法需求解复杂矩阵, 存储量和计算量较大, 多层快速多极子算法是在矩量法基础上发展起来的快速算法, 在保证精度的前提下, 提高了计算速度。其基本原理是采用多层分区计算, 对于参考点附近区直接数值计算, 非附近区使用多层快速多极子方法实现, 通过聚合、转移和配置将矩量法中的存储量和计算量降低<sup>[15]</sup>。因此本文中鸟类不同姿态 RCS 计算均采用多层快速多极子算法(multi-layer fast multipole method, MLFMM)进行求解。

## 3 考虑不同位置电磁散射特性影响的鸟类目标精细建模

鸟类飞行过程中会变换不同的扑翼姿态, 同时由于鸟类运动, 雷达与鸟类目标的方位角、俯仰角也在不断变

化,这些都会对雷达回波产生一定影响。MLFMM 可以精确计算鸟类目标 RCS,将阵列天线雷达回波模型和目标电磁散射特性相结合,能够较为准确仿真鸟类飞行过程中的回波信号。

为实现阵列天线鸟类回波的精细建模,首先通过 MLFMM 方法计算 3 种姿态一定范围内不同方位角和俯仰角下鸟类目标的 RCS( $t$  时刻对应的 RCS 用  $\sigma(t)$  表示),由于电磁计算运算量较大,为此对雷达扫描场景内的方位角和俯仰角按一定步长离散化,计算相应姿态对应的 RCS,再对不同方位和俯仰下  $\sigma$  进行线性插值,得到鸟类目标各个角度下 RCS,并将计算结果存入数据表中。对方位角  $\alpha$  处 RCS 进行插值,得到的  $\sigma(\alpha, \beta_1)$  为:

$$\sigma(\alpha, \beta_1) = \frac{\sigma(\alpha_2, \beta_1) - \sigma(\alpha_1, \beta_1)}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (19)$$

其中,  $\sigma(\alpha_2, \beta_1)$  和  $\sigma(\alpha_1, \beta_1)$  为已知的相应方位对应的 RCS 值,  $\beta_1$  为此时对应的俯仰角。

同理,对俯仰角  $\beta$  处 RCS 进行插值,得到的  $\sigma(\alpha_1, \beta)$  可写为:

$$\sigma(\alpha_1, \beta) = \frac{\sigma(\alpha_1, \beta_2) - \sigma(\alpha_1, \beta_1)}{\beta_2 - \beta_1} \quad (20)$$

其中,  $\sigma(\alpha_1, \beta_2)$  和  $\sigma(\alpha_1, \beta_1)$  为已知的相应俯仰对应的 RCS 值,  $\alpha_1$  为此时对应的方位角。

由于鸟类扑翼姿态是随时间而变化的,设鸟类初始姿态为上扑翼,一个运动周期内鸟类运动姿态变化 4 次(上扑翼—平扑翼—下扑翼—平扑翼—上扑翼),由振翅频率设置相应的姿态变化时间间隔,若扑翼频率为  $f$ ,则每个姿态时间设置为  $1/(4f)$ 。例如扑翼频率为 16 Hz,则每个姿态之间为 15.625 ms。鸟类扑翼姿态不断变化,在相应姿态下,计算其对应的方位角和俯仰角,查表求得对应的 RCS,将其作为反射系数代入阵列天线回波模型中,即:

$$S'_{l,k}(\hat{t}, t_m) = \sqrt{\sigma(t)} \cdot \sum_{i=1}^N T \cdot Sa[\pi B(\hat{t} - \tau_i)] \cdot \exp(j\psi) \cdot \exp(j2\pi f_d t_m) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi r_i(t_m)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(l-1)d\sin\theta_i}{\lambda}\right\} \quad (21)$$

式中:  $\sigma(t)$  为  $t$  时刻鸟类的 RCS。阵列天线雷达鸟类回波信号的精细建模流程如图 4 所示。

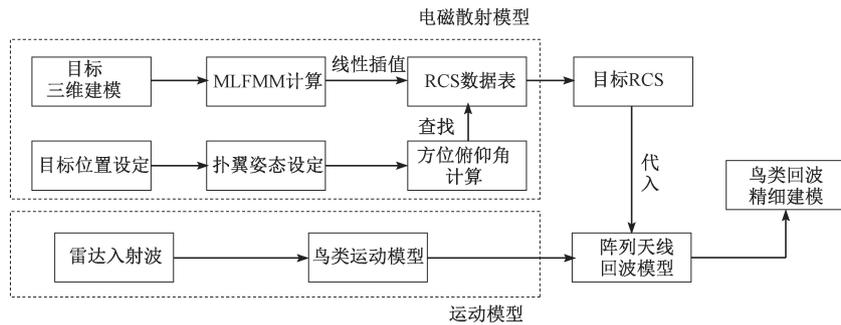


图 4 阵列天线鸟类回波信号精细建模实现框图

Fig. 4 The implementation block diagram of bird echoes fined modeling for array antenna

## 4 实验结果及分析

### 4.1 电磁散射特性分析

鸟类属于生物体,查阅相关资料可知,生物体介电常数与人体肌肉介电常数相似<sup>[16]</sup>,相对介电参数  $\epsilon_r = 50$ ,  $\tan\delta = 0.4$ 。鸟类(麻雀)模型参数中,体长 15 cm,上臂臂长 3.2 cm,前臂臂长 4.3 cm,振翅频率 16 Hz。根据建立的鸟类三维模型,利用 MLFMM 计算 3 种姿态下对应的雷达散射截面积。为便于与文献[17]结果进行比较,设入射波俯仰角为  $0^\circ$ ,方位角范围为  $0 \sim 180^\circ$ ,角度间隔为  $5^\circ$ ,入射波频率为 3.25 GHz,极化方式为水平极化,实验结果如图 5(a)所示。

图 5(a)为 3.25 GHz 鸟类 3 种姿态下 RCS 的变化情

况,图中可以看出:1) RCS 随方位角变化较为明显,不同方位角下 RCS 有较大区别,图中 RCS 最大值约为  $-19$  dBsm,最小值约为  $-39$  dBsm,相差 20 dBsm 左右。2)3 种姿态下 RCS 总体差距不是很大,在  $60^\circ \sim 110^\circ$  之间 3 种姿态吻合度较高,在  $0^\circ \sim 60^\circ$  与  $110^\circ \sim 180^\circ$  差异比较明显。这是由于在  $60^\circ \sim 110^\circ$  侧方照射时,鸟的翅膀与鸟体相比 RCS 所占比重较小,因此不同姿态下的变化值较小;而在  $0^\circ \sim 60^\circ$  与  $110^\circ \sim 180^\circ$  即从鸟的前方和后方照射时,鸟的翅膀与鸟体相比 RCS 所占比重变大,因此翅膀不同姿态产生影响较大。3)某一特定姿态下,侧方位照射 RCS 值较大,而前方和后方照射 RCS 值较小。

图 5(b)为伦敦大学的 Torvik 等利用 FDTD 方法计算鳀鸟处于平扑翼状态下使用不同介电常数的 RCS 变化情况<sup>[17]</sup>,为与实验结果比较,主要分析其介电常数为

肌肉(即图中 muscle 曲线)时 RCS 的变化特性。图中 RCS 最大值约为 -15 dBsm, 最小值约为 -50 dBsm, 相差 35 dBsm 左右, 在变化趋势上侧方照射 RCS 值较大, 前方和后方照射即从鸟的头部和尾部照射时 RCS 值较小, 与本文实验结果一致。RCS 值大小有所不同, 这主要是由于不同模型所设置参数不同而产生的差异; MLFMM 与 FDTD 两种方法内部参数(如网格划分等参数)设置不一致也可能产生相应的误差, MLFMM 网格剖分在目标表面, 本文使用三角形网格剖分, 而 FDTD 网格剖分通常为正方体, 在鸟类模型中可能会存在内部反射, 使 RCS 值偏大。

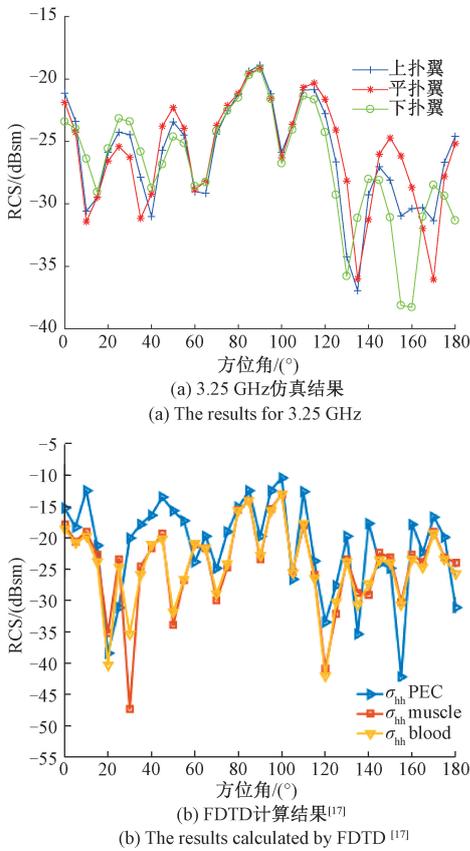


图 5 鸟类 RCS 变化曲线

Fig. 5 RCS variation curves of birds

图 6 为入射频率为 8 GHz 鸟类 3 种姿态 RCS 变化情况, 图 6 中 RCS 最大值约为 -19 dBsm, 最小值约为 -44 dBsm, 不同角度下 RCS 值变化较大, 在变化趋势上与图 5(a) 入射频率为 3.25 GHz 相同, 此处不再做具体分析。由于电磁散射特性受频率影响, 8 GHz 与 3.25 GHz 在不同角度下 RCS 值有所不同, 从整体看 8 GHz 3 种姿态 RCS 差距相比于 3.25 GHz 变小, 频率增大, 翅膀对不同姿态的影响变小, 这可能是由于目标尺寸与波长比变大使计算结果更精确, 差距更小。

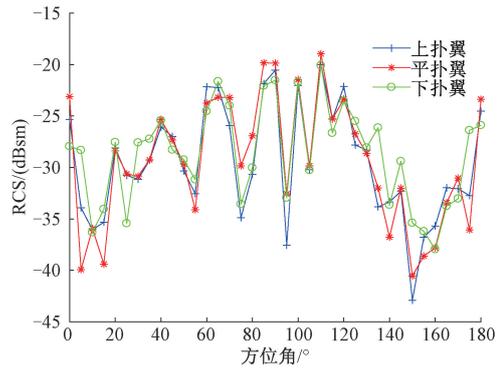


图 6 鸟类不同姿态 RCS 变化(8 GHz)

Fig. 6 RCS variance in different postures of birds (8 GHz)

### 4.2 回波信号微动特性分析

由于鸟类目标按一定速度运动, 雷达与鸟类目标径向速度分量会产生额外多普勒频率, 且鸟类翅膀的振动也会产生多普勒的频率扩展, 同时由于所建立的回波模型中考虑了不同观测角度下 RCS 的影响, 导致鸟类回波信号的微动特征更为复杂。

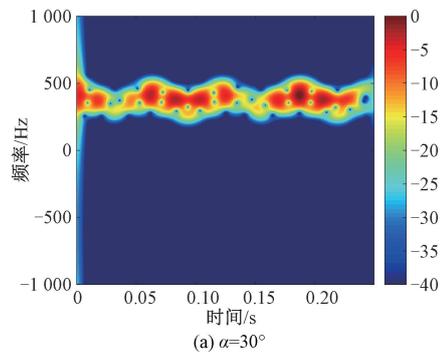
设鸟类目标飞行速度为 8 m/s, 飞行方向为 X 轴负向,  $A_1 = 40^\circ, \psi_{10} = 15^\circ, A_2 = 30^\circ, \psi_{20} = 40^\circ, C_2 = 20^\circ, \varphi_{20} = 0^\circ$ 。雷达发射信号为线性调频信号, 频率 8 GHz, 脉冲重复间隔 0.5 ms, 采样率 500 kHz, 脉冲带宽 200 MHz。电磁仿真视线范围方位角  $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ , 角度间隔为  $5^\circ$ , 俯仰角  $\varphi \in [0^\circ, 30^\circ]$ , 角度间隔为  $1^\circ$ , 极化方式为水平极化。这里利用短时傅里叶变化(short-time Fourier transform, STFT)对鸟类回波信号进行分析, 其定义为<sup>[18]</sup>:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) g(t - \tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau$$

其中,  $g(t)$  为高斯窗函数。

#### 1) 方位角与俯仰角对回波信号的影响

设鸟类与雷达视线的俯仰角  $\beta = 0^\circ$ , 方位角  $\alpha$  分别为  $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ , 鸟类目标初始坐标分别为  $(260, 150, 0)$ 、 $(150, 260, 0)$  和  $(0, 300, 0)$ , 单位为 m, 不同方位角下鸟类回波信号微动特征分析结果如图 7 所示。



(a)  $\alpha=30^\circ$

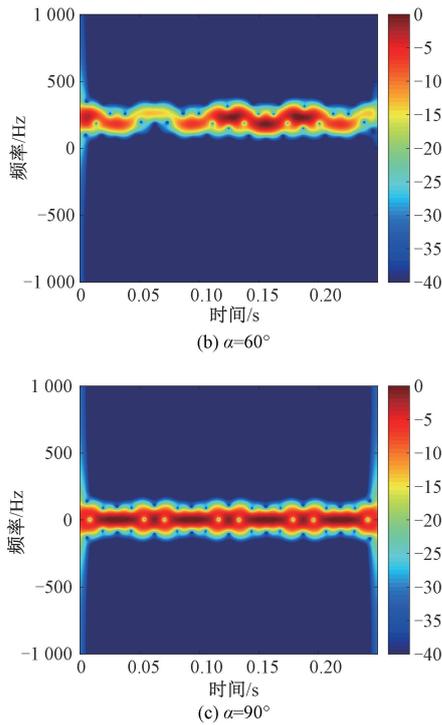


图7 不同方位角对时频分析的影响

Fig. 7 The influence of different azimuth angles on time-frequency analysis

由平动产生的频移  $f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \alpha' \cos \beta'$  可知, 径向速度分量会根据方位角的变化而发生改变, 方位角越大, 径向速度越小, 平动产生的频移越小。当方位角  $\alpha = 30^\circ$  时, 平移为 369.5 Hz, 方位角  $\alpha = 60^\circ$  时, 平移为 213.3 Hz, 方位角  $\alpha = 90^\circ$  时, 平移为 0。通过对比分析可知, 雷达与鸟类目标之间方位角为  $90^\circ$  时, 目标回波多普勒谱较为清晰且回波特征较为稳定。

设鸟类与雷达视线的方位角  $\alpha = 90^\circ$ , 俯仰角  $\beta$  分别为  $10^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$ , 鸟类目标初始坐标分别为  $(0, 200, 35)$ 、 $(0, 200, 73)$  和  $(0, 200, 115)$ , 单位为 m, 不同俯仰角下鸟类回波信号微动特征分析结果如图 8 所示。

同理, 由平动产生的频移  $f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \alpha' \cos \beta'$  可知, 方位角一定时, 俯仰角越大, 平动产生频移越小, 但此时由于方位角  $\alpha = 90^\circ$ , 所以径向速度为零, 平动产生频移为零。多普勒展宽是振翅运动产生的, 俯仰角越大, 振翅产生谱宽越宽。这是由于俯仰角增大, 翅膀有效长度变大, 导致多普勒频率的展宽变大。

由图 7、8 可知, 当改变雷达与鸟类目标的方位角和俯仰角时, 回波时频分析结果会随鸟类位置变化而相应改变, 鸟类目标振翅频率较低, 图中振翅引起的微多普勒

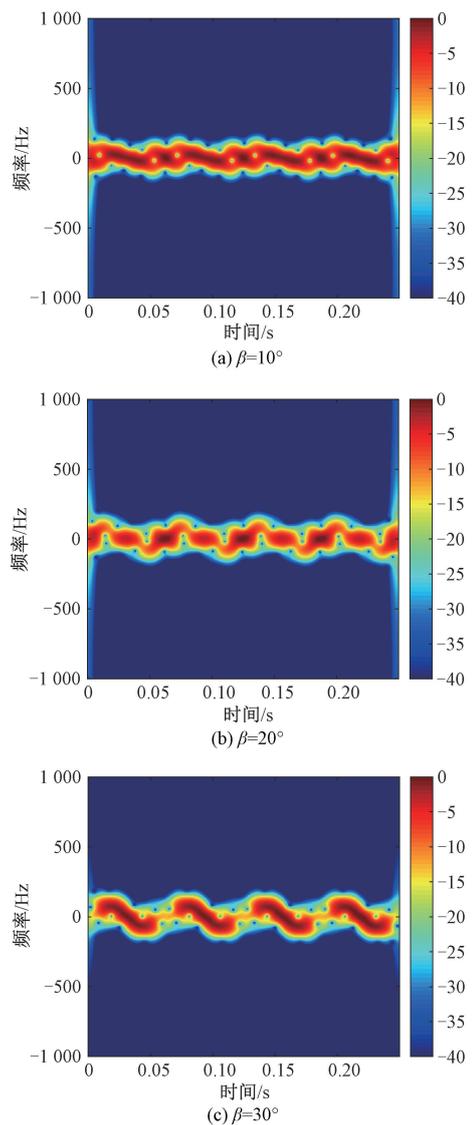


图8 不同俯仰角对时频分析的影响

Fig. 8 The influence of different pitch angles on time-frequency analysis

集中在低频区, 而无人机转速较快, 回波频谱调制明显, 两者微动特征有明显差异。

## 2) RCS 对回波信号的影响

为直观体现 RCS 对鸟类目标雷达回波的影响, 设鸟类目标初始位置为  $(22, 10, 0)$ , 单位为 m, 观测时间为 2 s, 实验结果如图 9 所示。

当观测时间变长时, 鸟类观测角度发生明显变化, 由图 6 可知, RCS 会随观测角度的变化而变化。实验中, 目标俯仰角为  $0^\circ$ , 方位角发生变化, 从初始位置的  $24^\circ$  变为  $59^\circ$ , RCS 的变化导致回波信号强度的变化, 图中可以看出考虑 RCS 影响的时频图相比于不考虑的能量明显降低, 且在 0.2~0.6 s 时间范围内考虑 RCS 影响的时频图

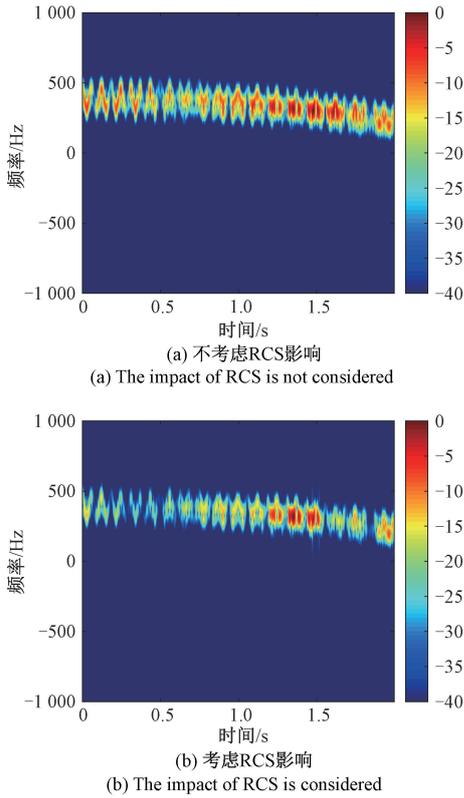


图 9 RCS 对雷达回波的影响分析(运动引起方位角发生变化)

Fig. 9 The influence analysis of RCS on radar echoes (The changes of azimuth caused by movement)

中信号能量值很小,在 1.5~1.8 s 也出现谱图模糊现象。

改变目标初始位置为 (20, 20, 5), 单位为 m, 此时不仅方位角会发生变化(从初始位置的 45°变为 79°), 俯仰角也会产生变化(从 10°变为 14°), 结果如图 10 所示。

图中可以看出在 1.2~1.6 s 时间范围内考虑 RCS 影响的时频图中信号能量值很小。这也说明当雷达观测鸟类目标实际运动时,由于观测角度问题会出现回波信号微弱或观测不到现象。

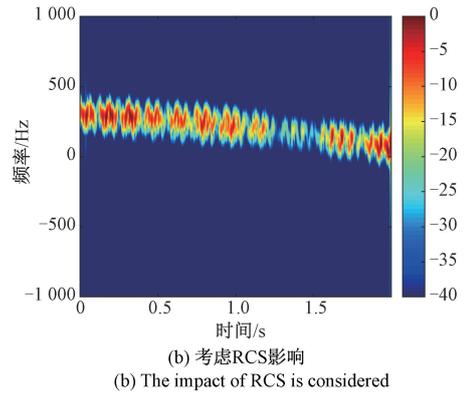
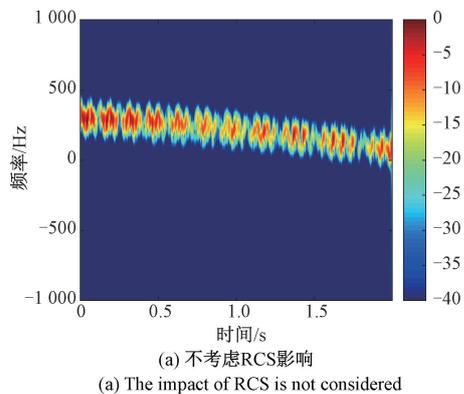


图 10 RCS 对雷达回波的影响分析(运动引起的方位及俯仰角均发生变化)

Fig. 10 The influence analysis of RCS on radar echoes (The changes of azimuth and pitch caused by movement)

通过对比考虑目标电磁散射特性与不考虑目标电磁散射特性结果,可以看出当考虑电磁散射特性时,鸟类目标回波会因观测角度的不同而产生变化。图 9 中在 0.2~0.6 s 频谱图中信号能量值很小,此时方位角在 30°左右,在图 6 中 30°左右处于一个较低值约为 -32 dBsm。RCS 的引入会引起雷达回波强度发生变化,使仿真数据更接近实测数据结果,因此考虑目标雷达散射特性的回波信号精细建模具有一定的实际应用价值。

### 5 结 论

针对鸟类回波数据较难获取的问题,本文提出了一种雷达回波模型与目标电磁散射特性相结合的阵列天线鸟类回波精细建模方法,结果表明鸟类目标处于不同姿态(上扑翼、平扑翼、下扑翼)时,其电磁散射特性会有所不同,同时当雷达从不同位置观测鸟类时,其对应 RCS 也有所不同,侧方观测 RCS 值较大,前方和后方 RCS 值较小,因此鸟类位置变化导致 RCS 的变化也会影响鸟类目标雷达回波信号。将阵列雷达鸟类回波信号模型与电磁散射特性相结合,可以高精度模拟鸟类飞行过程,得到任一观测点处的雷达回波信号,这对于鸟类的探测、识别及参数估计等问题,提供了理论基础及数据来源,也为后续鸟类与无人机辨识问题提供理论基础。

### 参考文献

[ 1 ] 于飞, 刘东华, 贺飞扬. 无人机“黑飞”对电磁空间安全的挑战[J]. 中国无线电, 2018, 4(8): 43-44.  
 YU F, LIU D H, HE F Y. UAV “black flying” challenges the safety of electromagnetic space[J]. China Radio, 2018, 4(8): 43-44.

[ 2 ] 陈小龙, 陈唯实, 饶云华, 等. 飞鸟与无人机目标雷达

- 探测与识别技术进展与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 803-827.
- CHEN X L, CHEN W SH, RAO Y H, et al. Progress and prospects of radar target detection and recognition technology for flying birds and unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Radars, 2020, 9(5): 803-827.
- [ 3 ] 张宏宏,甘旭升,李双峰,等. 复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 257-266.
- ZHANG H H, GAN X SH, LI SH F, et al. UAV route planning considering regional risk assessment under complex low altitude environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 257-266.
- [ 4 ] SCHRODER A, AULENBACHER U, RENKER M, et al. Numerical RCS and micro-Doppler investigations of a consumer UAV [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2016; 1-10.
- [ 5 ] TORVIK B, OLSEN K E, GRIFFITHS H, et al. Classification of birds and UAVs based on radar polarimetry[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(9): 1305-1309.
- [ 6 ] GUSTAVSSON M, ANDERSSON A, JOHANSSON T, et al. Micro-Doppler extraction of a small UAV in a non-line-of-sight urban scenario [C]. Radar Sensor Technology XXI. International Society for Optics and Photonics, 2017; 1-8.
- [ 7 ] GONG J K, YAN J, LI D R, et al. Interference of radar detection of drones by birds [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2019, 81: 1-11.
- [ 8 ] TORVIK B, KNAPSKOG A, LIE-SVENDSEN O, et al. Amplitude modulation on echoes from large birds [C]. 2014 11th European Radar Conference, 2014; 177-180.
- [ 9 ] 刘凯越,张晨新,刘刚,等. 基于扑翼模型的鸟类目标动态 RCS 的仿真研究[J]. 微波学报, 2016, 32(4): 15-20.
- LIU K Y, ZHANG CH X, LIU G, et al. Simulation of bird's dynamic RCS based on flapping wing model[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(4): 15-20.
- [ 10 ] CHEN V. The Micro-Doppler effect in radar. artech house remote sensing library [M]. Norwood: Artech House, 2011; 194-202.
- [ 11 ] RAMAKRISHNAN B, WONG K C. Animating bird flight using aerodynamics [J]. The Visual Computer, 1999, 15(10): 494-508.
- [ 12 ] HU C, LANG T, WANG R, et al. Electromagnetic scattering characteristics of flapping bird and experimental validation [J]. The Journal of Engineering, 2019, 19: 5860-5863.
- [ 13 ] ALDOWESH A, ALNUAIM T, ALZOGAIBY A. Slow-moving micro-UAV detection with a small scale digital array radar [C]. 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf), 2019; 1-5.
- [ 14 ] 朱文贵. 基于阵列信号处理的短波跳频信号盲检测和参数盲估计[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2007.
- ZHU W G. Blind detection and blind parameter estimation of high frequency FH signals based on array signal processing [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [ 15 ] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005, 10-12.
- HUANG P K, YIN H CH, XU X J. Radar target characteristic [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005; 10-12.
- [ 16 ] 李国庆,陈亚明,雷国华. 微波人体模拟肌肉组织的介电常数测量[J]. 中国医学物理杂志, 1995, 12(4): 243-245.
- LI G Q, CHEN Y M, LEI G H. The measurement of permittivity of a kind of phantom muscle tissue at microwave frequency [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 1995, 12(4): 243-245.
- [ 17 ] TORVIK B. Investigation of non-cooperative target recognition of small and slow moving air targets in modern air defense surveillance radar [D]. London: University College London, 2016.
- [ 18 ] ALDOWESH A, BINKHAMIS T, ALNUAIM T. Low power digital array radar for drone detection and micro-doppler classification [C]. 2019 Signal Processing Symposium (SPSymo), 2019; 203-206.

### 作者简介



何炜琨(通信作者), 2000年于中央民族大学获得学士学位, 2003年于中国民航大学获得硕士学位, 2012年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学智能信号与图像处理重点实验室教授, 主要研究方向为雷达信号处理, 风电场杂波抑制。

E-mail: hwkcauc@126.com

**He Weikun** (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Minzu University of China in 2000, received her M.Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2003, and received her Ph.D. degree from Tianjin University in 2012. She is currently a professor at Civil Aviation University of China. Her main research interests include radar signal processing and clutter suppression of wind farms.