

# 机载毫米波脉冲多普勒雷达旋翼目标识别技术研究

魏玺章<sup>1</sup> 刘 振<sup>1</sup> 黎 湘<sup>1</sup> 刘 丹<sup>2</sup>

(1. 国防科学技术大学空间电子信息技术研究所, 长沙, 410073;  
2. 南海舰队司令部第四处, 湛江, 524001)

**摘 要:** 旋翼目标是机载毫米波脉冲多普勒雷达低空与地面目标中的首要识别对象, 由于其回波频谱展宽与波长成近似反比关系, 使其在毫米波段呈现低信杂比、弱特征现象。本文首先在分析毫米波雷达旋翼目标特性的基础上, 针对旋翼识别难题, 对雷达系统前端的波束驻留时间、脉冲重复周期、杂波抑制性能、相参积累脉冲数、频综器相位噪声谱密度等参数设计提出了新的要求; 之后, 设计了专用目标识别软件平台, 并给出了面向工程应用的专用目标识别软件总体结构, 提出了利用噪声归一化的频谱数据预处理技术、识别结果积累策略以及多普勒频谱层析图分析等信号处理方法; 最后, 利用实测数据提取特定的特征对目标进行识别分类, 并对部分中间结果进行了详细分析, 实验结果验证了本文方法的有效性, 对旋翼和固定翼目标具有良好的分类识别性能。

**关键词:** 机载; 毫米波; 脉冲多普勒; 旋翼; 目标识别

**中图分类号:** TN911.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2012)02-0232-08

## Research on Rotorcraft Recognition Technology in Airplane-Carried Millimeter-Wave PD Radar

WEI Xi-zhang<sup>1</sup> LIU Zhen<sup>1</sup> LI Xiang<sup>1</sup> LIU Dan<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Space Electronics Information Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China;  
2. 4th department of South China Sea Fleet Command, Zhanjiang, Guangdong 524001, China)

**Abstract:** Among the low attitude and ground targets, rotorcrafts are the most important to be recognized in the airplane-carried millimeter wave pulse Doppler radar. Rotorcraft targets suffer from low signal to clutter rate and weak characters at millimeter waveband because the width of modulated spectrum of its radar echoes is inversely proportional to the signal wavelength. This paper first analyzes the feature of rotorcrafts in the millimeter-wave radar. And aiming at the involved rotorcraft recognition we propose some new requirements for parameters of the radar system, such as the beam dwell, pulse repeat interval, performance of clutter suppression, number of coherent integration pulses and phase noise spectrum density of the frequency synthesizer. Then, the specific target recognition platform is designed and the main structure of the software oriented at engineering application is given. Some key signal processing technologies are proposed such as spectrum pretreatment technology with noise normalization, accumulating strategy of recognition results and the ripple slice mapping of Doppler spectrum etc. Finally, the experimental data are used for feature extracting and target recognizing, and some medium results are discussed in detail. The experiment results demonstrate that the theoretical analyses in this paper are efficient and the proposed methods perform well in recognition of rotorcraft and fixed-wing aircraft targets.

**Key words:** airplane-carried; millimeter-wave; pulse-Doppler; rotor blade; target recognition

## 1 引言

武装直升机由于具有火力强、机动性好、抗毁能力

强、全天候、便于协同作战以及独特的悬停性能等特点在现代战争中扮演着越来越重要的角色, 已成为低空与地面作战中的首要探测、识别对象。旋翼目标回波

主要由机身回波、主旋翼回波、尾旋翼回波和叶毂回波等四个部分组成<sup>[1]</sup>。主旋翼一般由几片叶片组成,通常在水平面内旋转,其产生的回波具有较强的幅度和宽的多普勒频谱;而尾旋翼相对于主旋翼来说,叶片长度较短,在与主旋翼旋转面相垂直的平面内作旋转(转速相对较快),反射回波较弱,由于受到机身的遮挡作用,雷达波束经常照射不到;而叶毂 RCS 较小,其回波具有窄的多普勒频谱;因此,针对旋翼目标的识别主要还是针对主旋翼的调制特征。

针对旋翼目标识别难题,文献[1]-[3]分别从线模型逼近和电磁计算的角度分析了旋翼的散射特性。目前尚没有文献对旋翼毫米波段的电磁特性进行分析,但从文献[2]5GHz-18GHz 的计算结果趋势看,线模型可较好的逼近毫米波段旋翼目标的电磁特性。文献[1]从时频分析的角度初步研究了米波段旋翼目标的检测问题。针对旋翼识别的难点问题,文献[4]、[5]转而研究了叶毂的检测问题。根据旋翼后向散射模型,旋翼回波在时域上呈现辛格函数形状,在频域上表现为频谱展宽,其频谱展宽宽度与雷达波长成近似反比关系,需要很高的脉冲重复频率才能采样到旋翼信号,而这与雷达最大不模糊距离的限制是相互矛盾的。在实际情况下,由于旋翼本身的材料特性、雷达重频、波长等参数及强地物杂波的限制,毫米波雷达旋翼目标回波往往体现为低信杂比、弱特征信号特性,使得旋翼的探测与识别十分困难。

本文针对机载毫米波脉冲多普勒雷达旋翼目标识别难题,首先回顾了经典的旋翼回波线模型,对机载毫米波脉冲多普勒雷达系统前端参数设计首次提出了具有一定普适性的要求;之后,设计了旋翼目标识别软件,着重对软件平台的总体设计及数据预处理、特征提取与识别策略、数据分析与回放等关键技术进行了深入分析,并提出了面向工程应用的专用目标识别软件总体结构、利用噪声归一化的频谱数据预处理技术、积累识别策略以及多普勒频谱层析图分析等方法;最后,通过实测数据验证了本文的工作,并对部分中间结果进行了详细分析。

## 2 毫米波雷达旋翼目标特性

旋翼一般由复合材料制成,其精确的 RCS 特性难以获得,文献[1]-[3]、[5]对旋翼的 RCS 进行了简单假设或电磁计算,但由于均没有考虑复合材料的具体特性而不可信。本文没有考虑旋翼 RCS 特性的计算

问题,并假设旋翼 RCS 通过测量已知。

根据文献[1],旋翼桨片可以等效为一个长度为  $l-r$  的理想线源, $l$  是桨片外端至叶毂中心点的长度, $r$  是桨片内端至叶毂中心点的长度。当旋翼有  $N$  根桨片时,其回波表现为 sinc 函数的周期性闪烁形式,且直升机结构、运动状态、雷达工作参数以及直升机与雷达的相对几何位置对直升机旋翼回波都有影响。当  $\ll l-r$  时,闪烁脉冲的主瓣时宽(即 sinc 函数的主瓣宽度)可近似的认为

$$\Delta T = \frac{k}{4 F_{rot}(l-r)} \quad (1)$$

当桨片数目  $N$  为奇数时, $k=2$ ;当  $N$  为偶数时, $k=1$ 。其中  $F_{rot}$  是旋翼旋转频率,为雷达波长。

旋翼回波的闪烁频率  $F_p$  定义为:雷达波束连续照射旋翼时,单位时间内产生的 sinc 闪烁主瓣数目。每根旋翼桨片在一个旋转周期内产生两个闪烁脉冲;当  $N$  为偶数时,两个对称叶片将同时产生闪烁脉冲。这样闪烁频率为

$$F_p = kNF_{rot} \quad (2)$$

旋翼回波多普勒展宽为

$$F = \frac{4 F_{rot}(l-r)}{\lambda} \quad (3)$$

在 8mm 频段,武装直升机的典型闪烁脉冲的主瓣宽度一般为 us 级,螺旋桨为偶数时主旋翼回波周期一般为 52ms 左右(奇数时为 26ms 左右)。而机载雷达的脉冲重复周期、波驻周期等一般难以充分满足旋翼回波的探测要求,加之强地物杂波的影响,使得旋翼回波信号往往体现为低信杂比、弱特征信号特性,给旋翼目标识别带来了很大的困难。

## 3 旋翼目标识别对机载脉冲多普勒雷达前端参数设计要求

本节主要针对脉冲多普勒雷达系统前端参数设计问题,如:波束驻留时间、脉冲重复周期、杂波抑制、相参积累脉冲数、频综器相位噪声谱密度等,首次提出了具有一定普适性的设计要求。

### 3.1 波束驻留时间

波束驻留时间与几个方面的指标相关:

- 作战目标数量或搜索区间
- 多普勒杂波抑制性能
- 旋翼回波信号的探测概率

波束驻留时间与作战目标数量或搜索区间成反比

关系,与多普勒杂波抑制性能和旋翼回波信号的探测概率成正比关系。因此,在满足系统探测性能要求的前提下增加系统的波束驻留时间对于提高目标识别性能是十分必要的。目标波束驻留时间  $T$  要求为大于主旋翼回波周期  $(1/F_p)$ , 即  $TF_p \geq 1$ , 此时探测到旋翼回波信号的概率为 100%。当波束驻留时间无法达到此要求, 即  $TF_p < 1$  时, 可以考虑采用积累方法来等效提高对某一待识目标的波束驻留时间, 设积累脉冲数为  $N$ , 要求的主旋翼回波信号探测概率  $\geq 90\%$ , 那么二者的关系为:

$$1 - (1 - TF_p)^N \geq 90\% \quad (4)$$

### 3.2 脉冲重复周期

假定雷达脉冲宽度为  $\tau$ , 脉冲重复周期为 PRT, 旋翼回波有效探测为闪烁脉冲 3dB 宽度  $\Delta T_{3dB}$ 。在旋翼有效脉冲内最少有一点采样的条件是<sup>[1]</sup>

$$PRT - \tau < \Delta T \quad (5)$$

### 3.3 杂波抑制性能

多普勒杂波抑制性能是利用频域信息识别旋翼目标的前提, 其与波驻内的脉冲数成正比例关系。根据目前的杂波抑制水平<sup>[6][7]</sup>, 对杂波抑制性能可要求如下:

谱中心估计均方差 + 谱宽估计均方差  $\leq$  半个频率分辨单元

### 3.4 相参积累脉冲数 $M$

相参积累脉冲数和脉冲重复周期、波长联合决定了多普勒速度分辨力, 而利用多普勒频谱识别目标的前提是能够获得目标多普勒频谱展宽的轮廓像, 因此必须对相参积累脉冲数作出约束。设目标多普勒频谱轮廓像的展宽要求为大于  $K$  ( $K$  一般大于 10) 个多普勒分辨单元, 杂波宽度上限为  $n$  个多普勒分辨单元, 则相参积累脉冲数应满足如下约束:

$$\min[F \cdot PRT, M] - n \geq K \quad (6)$$

### 3.5 机载振动环境下的频综器相位噪声谱密度

雷达频综器在机载条件下由于载机的振动, 输出相噪将严重恶化, 使雷达杂波下能见度显著变坏, 其不但会导致雷达的检测概率大幅下降, 更会严重恶化多普勒频谱的识别性能。频综器在振动条件下的输出相噪只与晶体的加速度灵敏度、振动的功率谱密度及其分布等因素有关, 与静态相噪没有关系。在振动条件下, 1Hz 带宽内的杂波噪声应该比信号小的 dB 数为<sup>[8]</sup>

$$10 \log S/N + 10 \log B + 6(\text{dB}) \quad (7)$$

其中  $10 \log S/N$  是系统检测到旋翼信号所要求的信噪

比(通常取 14dB),  $B$  是多普勒滤波器带宽。假定杂波下的能见度要求为 40dB, 那么与此对应的频综器 1kHz 频偏处的要求就是

$$L(f_m) = -40 - [10 \log \frac{S}{N} + 10 \log B + 6(\text{dB})] \text{ dBc/H z} \quad (8)$$

而实际系统的能见度要求可能远低于 40dB, 因此, 对振动条件下频综器输出信号的相位噪声谱密度要求应更高一些。

## 4 目标识别软件平台设计

目标识别算法开发最重要的特征就在于理论研究与工程实现往往是同步进行的, 算法的挑选和调整是一个长期演化的过程, 难以在系统设计时完全确定。为解决该问题, 需要研制专用机载雷达目标识别软件平台, 以方便工程应用中快速的算法寻优与参数调整。本节, 首先针对目标识别系统的研制需求, 进行了目标识别软件平台总体设计, 在此基础上, 针对目标识别中的数据预处理、特征提取与识别、数据分析与回放等三项关键技术进行阐述。

### 4.1 目标识别软件平台总体设计

根据雷达目标识别过程的特点, 通常情况下其核心数据处理流程如图 1 所示<sup>[9][10]</sup>。图中框内注明了模块的名称, 粗箭头表示数据的流向, 细箭头表示选项控制。

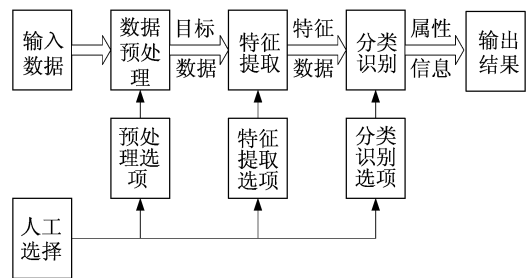


图 1 软件平台的核心数据处理流程图

Fig. 1 Flow chart of data processing with software platform

由图 1 可以看出, 数据处理的每一步都是由参数选项控制的, 这样做的好处是, 工程人员可以通过改变参数选项, 调整平台的工作状态, 改进平台的性能, 或者对某一新加入的模块进行测试, 确定其最优的工作参数。平台对输入数据的处理主要包括数据预处理、特征提取和分类识别等三个步骤, 这也是雷达目标识别的基本处理过程。然而, 从功能完备性角度出发, 完整的雷达目标识别软件平台还应该包括数据获取、信息存储、平台管理、结果评价和人机交互等

组成部分<sup>[9]</sup>。我们对图 1 进行分解、补充和完善后,得到如图 2 所示的软件平台的总体结构,其中算法训

练与测试、算法识别回放遵循图 1 所示的数据处理流程。

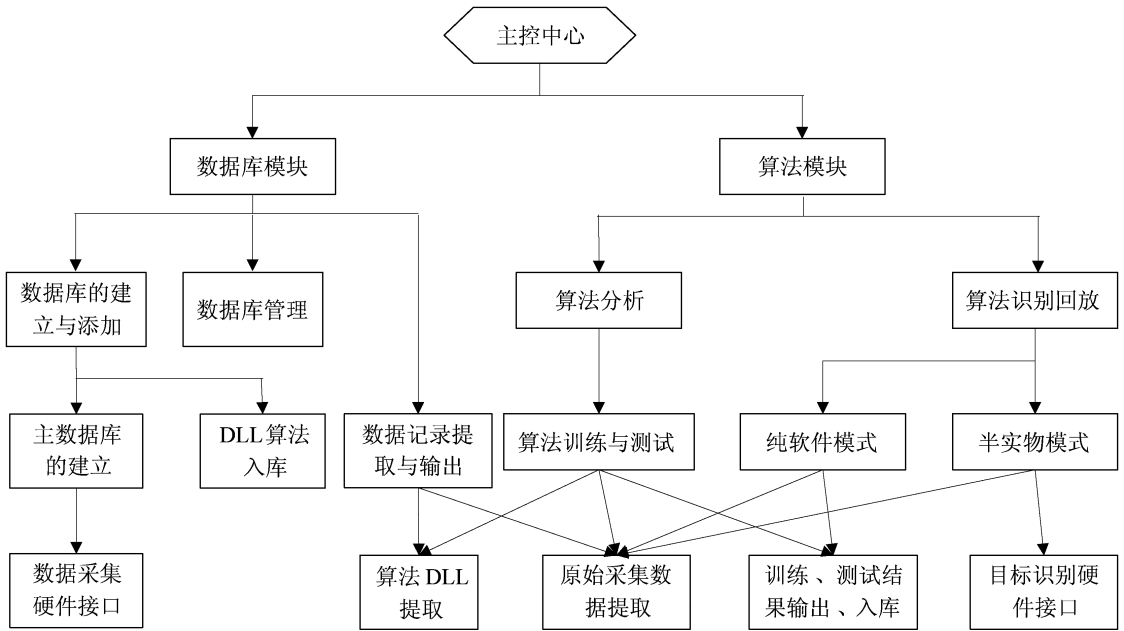


图 2 软件平台总体结构

Fig. 2 Frame of software platform

为保障各个设计模块的独立性和内聚性,在定义完整的接口数据的前提下,各个模块及子模块内部可通过封装的不同 DLL 实现不同算法,并通过平台对算法进行选择、组合与优选。

#### 4.2 数据预处理

在以往的目标识别技术研究中,数据预处理往往是被忽视的一个环节,更多的注意力放在了特征提取阶段。而在实际情况下,数据预处理恰恰是识别过程中最关键的环节,是保障不同尺度、不同杂波环境下目标数据能否体现可识别特征的主要且唯一措施。在后面的分析中也可以发现,通过好的预处理手段,可以使得特征提取和分类识别两个环节的难度也适当减小。数据预处理主要包括杂波去除和归一化两个部分的内容,下面分别展开论述。

##### 4.2.1 杂波去除

目标多普勒频谱主要由目标频谱、杂波和接收机噪声三部分组成,而杂波又可以分为高度线杂波、主杂波、旁瓣杂波<sup>[6][7][11]</sup>。杂波去除的关键在于精确估计杂波谱的中心以及谱宽。高度线杂波谱的中心可以由载机平台的相对速度得知,谱宽一般为 3-4 个频率门。主杂波谱中心的估计方法较多,如相关函数法、最大熵方法、质心法等。主杂波谱宽的估计方法也有很多,如

统计信号法、积分法等。旁瓣杂波一般由擦地的旁瓣引起,只有当目标距离与旁瓣回波距离段重合时旁瓣杂波才能体现在目标多普勒频谱中,可依据此原则剔除旁瓣杂波的影响。

##### 4.2.2 噪声归一化

传统的归一化是利用频谱上的最大值(即目标的幅度)或二范数对所有频谱进行归一化,但在毫米波段,目标 RCS 随姿态起伏很大,传统的归一化方法非但不能起到统一频谱尺度的作用反而使得频谱之间的差异更加明显。考虑到识别旋翼目标的关键是在多普勒频谱上提取旋翼的调制特征,因此,我们提出了利用噪声进行频谱归一化的方法。

实际情况下,由于自动增益控制 AGC 等参数的影响,每一个 CPI 回波的噪声水平会有不同程度的差异。为了统一所有 CPI 之间的噪声基底,需要对每个 CPI 回波的噪声进行估计,并用估计的噪声除上目标的多普勒频谱。在统计噪声时,距离门上,除了目标所在距离门(避免因为目标 RCS 较大影响对杂波的统计)、以及近端可能存在干扰的距离门(是否存在干扰根据雷达具体情况而定),对其他所有距离门进行处理;在频率门上,主要去除主杂波和高度线杂波所在频率门,在某些距离门还要考虑旁瓣杂波的影响。图 3 为噪声估计示意图。

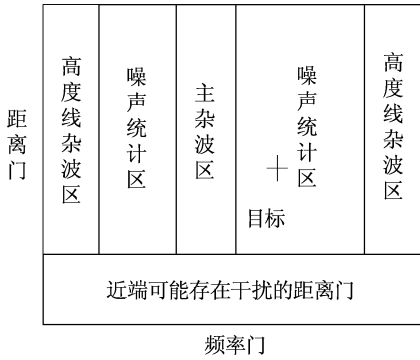


图3 噪声估计示意图

Fig.3 Sketch map of noise estimation

### 4.3 特征提取与识别

本节主要介绍特征提取算法、分类识别算法及识别积累策略三个部分的内容。

#### 4.3.1 特征提取

为了充分验证各种特征提取算法的性能,我们在软件平台中集成了具有平移尺度不变性的矩特征<sup>[12]</sup>,能够反映目标能量随频率分布且可完全抑制高斯噪声的双谱特征<sup>[13]</sup>,以及能够体现频谱结构的形状统计量特征<sup>[14]</sup>。具体特征的提取方法在本文不再重复表述。

#### 4.3.2 分类器设计

雷达目标识别系统的分类器设计除了回波信号本身往往不能包含足够的反演目标特征的信息这一难题外,另外一个更主要的因素是实测数据缺乏遍历性和代表性,体现在识别过程中是数据的小样本性。传统的分类识别算法往往表现为对已经录取的试验数据训练、测试效果较好,而在新的试验过程中识别性能却有较大幅度的下降。为此,我们在平台中主要采用具有良好推广性能和在线学习功能的支持向量机分类器<sup>[15]</sup>,以提高识别系统的推广性能。

#### 4.3.3 积累策略

如前所述,旋翼旋转周期一般远大于雷达波束驻留时间,需要积累多个波驻周期才可以实现一次旋翼回波的探测。因此,为了进一步提高旋翼识别性能,我们设计了N-K准则的积累识别策略<sup>[16]</sup>。其中 $q_D$ 代表积累前旋翼正确识别概率, $P_D$ 代表积累后的旋翼正确识别概率, $q_F$ 代表固定翼积累前错误识别概率, $P_F$ 代表积累后的固定翼错误识别概率。

$$P_D = \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} (q_D)^i (1 - q_D)^{N-i} \quad (9)$$

$$P_F = \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} (q_F)^i (1 - q_F)^{N-i} \quad (10)$$

### 4.4 数据分析与回放

一个面向工程应用的目标识别系统应该能够方便、快速的对各种方法的性能进行分析,针对旋翼识别的特殊性,本节主要介绍平台中集成的多普勒频谱层析图、特征直方图及识别回放等三部分的功能。

#### 4.4.1 多普勒频谱层析图

文献[17]中利用层析法描述目标窄带回波波形序列之间的变迁(相关)特性和对某段数据进行精确分辨的特性,用于飞机目标架次识别。本文借鉴其层析的思想,提出了多普勒频谱层析方法,用于判断各种预处理算法的有效性。

在进行数据预处理后,对多普勒频谱数据进行目标多普勒频率门中心对齐。连续采集 $M$ 个回波多普勒频谱 $\{w[x]\}$ ,按其先后组成数据帧 $I_0[f]$ ,其中第 $i$ 个频谱上第 $j$ 个点的幅度可用 $q_{i,j} = a(i, j)$ 表示。若数据点 $q_{i,j} = a(i, j)$ ,有 $q_{i,j} \in (z - \varepsilon, z + \varepsilon)$ , $\varepsilon > 0$ ,则标记 $q_{i,j}$ ,同时按照下列公式计算 $q_{i,j}$ 的灰度值 $G_{i,j}$ :

$$G_{i,j} = \frac{255}{\max - \min} \cdot q_{i,j} + \frac{255 \cdot \min}{\min - \max} \quad (11)$$

其中 $z$ 表示层析位置, $\varepsilon$ 表示层析高度, $\max$ 表示标记的 $q_{i,j}$ 的幅度最大值, $\min$ 表示标记的 $q_{i,j}$ 的幅度最小值。按回波先后次序排列,则得到 $M$ 个回波多普勒频谱的灰度层析图,流程图如图4所示。

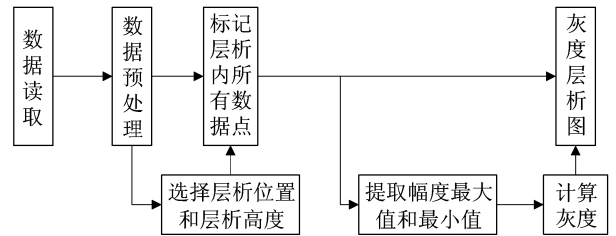


图4 多普勒频谱层析图计算流程图

Fig.4 Calculation chart of the ripple slice mapping of Doppler spectrum

由此可见,多普勒频谱层析图具有如下特性:

- 可以体现待识别的多普勒频谱是否具有可区别旋翼与固定翼的特征;
- 可以描述目标多普勒频谱序列之间的变迁(相关)特性,并用于指导积累策略的参数选择;
- 若可发现旋翼调制特性,可以描述旋翼调制的起伏特性,可以指导特征提取方法的进一步改进;

#### 4.4.2 特征直方图

特征直方图是分析特征有效性的最直观手段,其定义可参见文献[12]。

#### 4.4.3 识别回放

类似于雷达系统的检测、跟踪性能回放,识别回放在识别系统的设计中也有着很重要的作用,区别仅在

于识别回放只需要在中频数据开始。识别回放在识别系统设计中的作用主要体现在以下几个方面:

➤ 对算法在目标全姿态的识别性能进行验证,并进一步指导算法的改进。一个实测正确识别率 90% 的识别算法,有可能其错误只是发生在某些特定的目标姿态角内,通过识别回放,可以判断识别算法在某些特殊姿态及整体情况下的识别性能,并促进研究人员进一步分析目标特性,改善识别算法;

➤ 有助于确定系统的识别距离。识别一般在对目标稳定跟踪后进行,并且由于识别算法对信杂比的要求远高于检测算法,识别距离一般与检测距离有较大的差距。目前识别距离的确定还没有一套行之有效的方法,实际情况下积累识别策略也使得在识别初期的识别性能不太稳定,而通过识别回放,可以直观的判断稳定识别的距离,进而有助于系统识别距离的进一步确定。

## 5 试验验证与分析

为了验证软件平台及关键算法的正确性,通过外场试验数据进行了测试。其中雷达目标类型为某型固定翼和旋翼飞机。

### 5.1 多普勒频谱层析图

图 5 为采用传统的幅度归一化后的多普勒频谱层析图,由图可以看出,尽管能够部分地观察到旋翼的调制特性,但由于噪声基准不统一等因素的影响,固定翼层析图上也出现了类似的调制特性,在对数据不做归一化时其层析图大体类似。图 6 是采用噪声归一化后的多普勒频谱层析图,由图我们可以清晰地看到区别于固定翼目标的旋翼调制特性,而且部分旋翼目标的调制只是出现在一侧,这是由旋翼的桨片数量决定的<sup>[3]</sup>。另外,通过层析图上旋翼调制出现的概率,可以进一步指导积累识别策略的设计。图 7 左侧为某次试验时固定翼目标的层析图,通过对比其回波频谱,可以发现前端在杂波边界估计时产生了较大的误差,图 7 右侧为一个典型的杂波去除不完整的目标多普勒频谱。

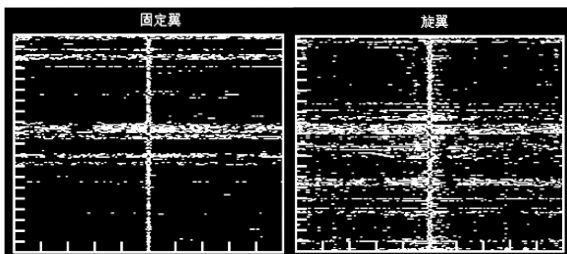


图 5 采用幅度归一化后的多普勒频谱层析图  
Fig. 5 The ripple slice mapping of Doppler spectrum with amplitude normalization

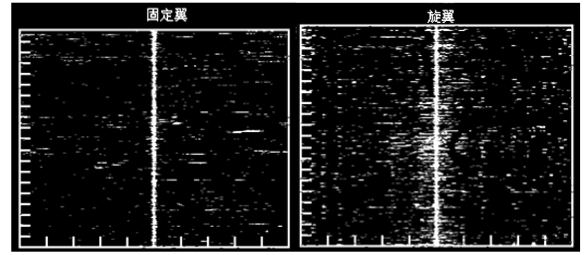


图 6 采用噪声归一化后的多普勒频谱层析图  
Fig. 6 The ripple slice mapping of Doppler spectrum with noise normalization

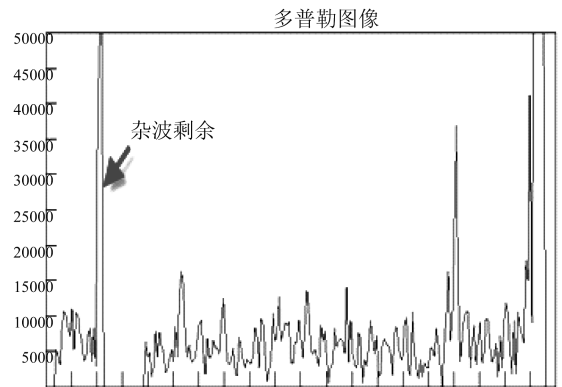
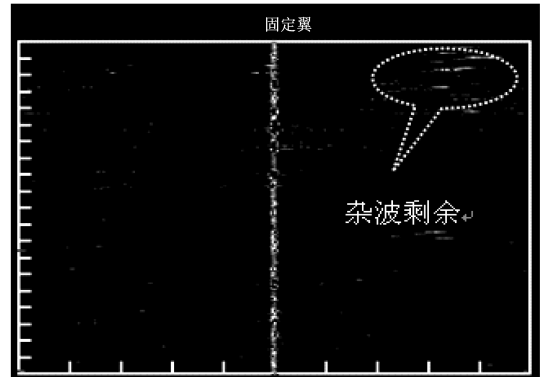


图 7 目标多普勒频谱杂波去除特性分析  
Fig. 7 Clutter elimination characteristic of Doppler spectrum

### 5.2 特征直方图

利用实测数据对 3.3 节的特征集进行了特征直方图测试。经过测试发现,前 5 阶中心矩特征和前 3 个双谱特征在分类性能上更优。图 8 是典型的中心矩和双谱特征直方图,其他各阶具有类似的形式。

### 5.3 识别结果

通过识别回放对算法性能进行了深入测试。表 1 为对某次试验数据的识别率的统计,通过识别结果可以看到积累后的识别性能较积累前有较大幅度的提升。另外,发现某一架次的固定翼飞机的近距离短总是识别错误,通过比较其层析图发现在部分角度及近

距离内,固定翼目标的螺旋桨调制也会十分明显,如图9所示,这与文献[18]的分析是一致的。根据螺旋桨调制信号出现的部分姿态及近距离信息,可以方便的将其剔除,以保障系统的整体识别性能。

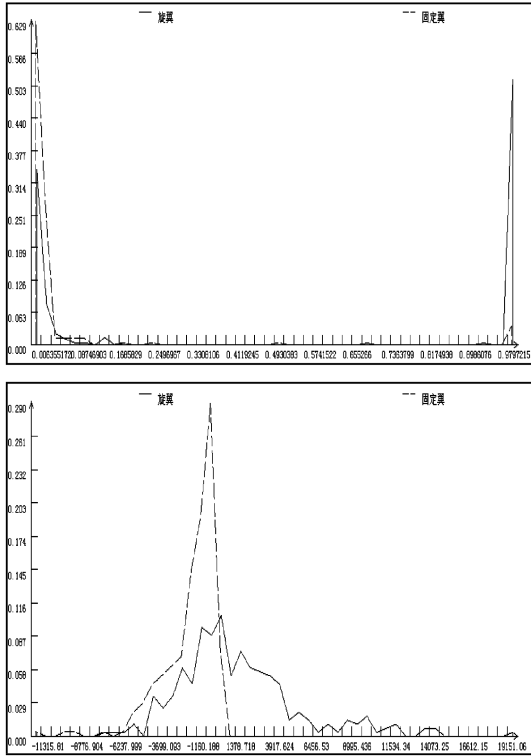


图8 二阶中心矩特征和双谱特征直方图

Fig.8 Distribution maps of second central moment feature and bi-spectrum feature

表1 识别性能统计

Tab.1 Performance of classification

目标类型	数据量	识别率	
		未积累	积累
固定翼	216	84%	96%
旋翼	195	82%	90%

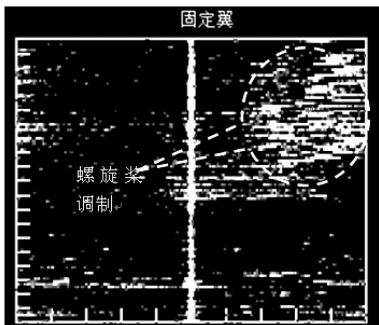


图9 具有螺旋桨调制的固定翼目标多普勒频谱层析图

Fig.9 The ripple slice mapping of Doppler spectrum for fixed-wing target with propeller

## 6 结束语

本文针对机载毫米波脉冲多普勒雷达旋翼识别难题,在分析其电磁特性的基础上,对雷达系统前端参数设计提出了新的要求;从工程角度,设计了目标识别软件平台,并着重对软件平台的总体设计、数据预处理、特征提取与识别策略、数据分析与回放等关键技术进行了深入分析。最后,利用实测数据验证了本文的工作。后续需要对特征选择问题,及 N-K 积累策略与分类器的联合设计问题展开研究。

### 参考文献

[1] Philippe P, Lionel L, Franck M, Calculation and Analysis of Electromagnetic Scattering by Helicopter Rotating Blades[J], IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(10):1396-1408.

[2] Gini F, Farina A. Matched Subspace Approach to CFAR Detection of Hovering Helicopters[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1999, 35(4):1293-1305.

[3] 汤子跃,王永良,蒋兴舟. 悬停直升机检测问题研究[J]. 现代雷达, 2000, 22(1):15-19.  
Tang Ziyue, Wang Yongliang, Jiang Xingzhou. Radar Detection of Hovering Helicopter [J]. MODERN RADAR, 2000, 22(1):15-19. (in Chinese)

[4] Misiurewicz J, Kulpa K, Czekala Z. Analysis of Recorded Helicopter Echo[A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference [C]. Edinburgh: IEEE, 1997. 449-453.

[5] Misiurewicz J, Kulpa K, Czekala Z. Analysis of Radar Echo from a helicopter rotor hub[A]. 866-870.

[6] 李刚,许稼,彭应宁. 用于机载雷达杂波谱中心估计的极坐标质心法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(10), 1348-1351.  
LI Gang, XU Jia, PENG Yingning. Polar coordinate centroid method for estimating clutter spectrum centers in airborne radar[J]. JOURNAL OF TSINGHUA UNIVERSITY (SCIENCE AND TECHNOLOGY), 2005, 45(10), 1348-1351. (in Chinese)

[7] 黄勇,彭应宁,王秀坛等. 杂波谱中心 Doppler 频率和谱宽的快速估计算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(1), 33-36.  
HUANG Yong, PENG Yingning, Wang Xiutan, etc. Fast method for estimating center Doppler frequency and bandwidth of clutter spectrum[J]. JOURNAL OF TSINGHUA UNIVERSITY (SCIENCE AND TECHNOLOGY), 2001,

- 41(1),33-36. (in Chinese)
- [8] 王全龙,赵海清. 机载雷达频综器的相位噪声及其对杂波下能见度的限制[J]. 电讯技术,2000, No. 4, 1-6.  
Wang Quanlong, Zhao Hai Qing. The Phase Noise Of Frequency Synthesizer For Radar And Visibility's Limitation In The Background Of Clutter [J]. TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING, 2000, No. 4, 1-6. (in Chinese)
- [9] 宋锐. 雷达舰船目标识别系统实现技术研究[D]. 长沙:国防科技大学博士学位论文,2002. 9  
Song Rui. Research on Radar Ship Target Recognition System Implementation Technology[D]. PhD thesis, National University of Defense Technology, 2002. 9. (in Chinese)
- [10] Ruda H, Snorrason M, Shue D. Framework for automatic target recognition optimization[R]. Charles River Analytics, Report No. R96451, 1999.
- [11] Morris, G. V. . Airborne Pulsed Doppler Radar. Artech House Publishers, 2007.
- [12] 袁莉,刘宏伟,保铮等. 基于中心矩特征的雷达 HRRP 自动目标识别[J]. 电子学报,2004, 32(12).  
YUAN Li, LIU Honfwei, Bao Zhen, etc. Automatic Target Recognition of Radar HRRP Based on Central Moments Features [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2004, 32(12). (in Chinese)
- [13] 姬红兵,高新波,谢维信. 雷达目标双谱特征分析与分类方法研究[J]. 西安电子科技大学学报,1999, 26(6):691-694.  
JI Hong-bing, GAO Xin-bo, XIE Wei-xin. Study of bispectrum signatures of radar targets and classification techniques[J]. JOURNAL OF XIDIAN UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE), 1999, 26(6):691-694. (in Chinese)
- [14] 廖东平,朱孝开,魏玺章等. 基于形状统计量的空中目标识别. 系统工程与电子技术, 2005, 27(8), 1394-1396.  
LIAO Dong-ping, Zhu Xiao-kai, WEI Xi-zhang, etc. Identification of air targets based on shape statisticsp[J]. SYSTEMS ENGINEERING AND ELECTRONICS, 2005, 27(8), 1394-1396. (in Chinese)
- [15] 廖东平. 支持向量机方法及其在机载毫米波雷达目标识别中的应用研究[D]. 长沙:国防科技大学博士学位论文,2006.  
Liao Dongping. Study on Support Vector Machine Method and Its Application in Target Recognition for Airborne MMW Radar[D]. PhD thesis, National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [16] 何友,王国宏,陆大琰. 多传感器信息融合及应用. 电子工业出版社,2000.
- [17] 张汉华. 低分辨率雷达目标架次判别特征描述与提取方法研究[D]. 长沙:国防科技大学博士学位论文,2004.  
Zhang Hanhua. Research on feature description and extraction of target vehicle identification in low-resolution radar [D]. PhD thesis, National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [18] David K. Barton, Sergey A. Leonov. Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition). Artech House, Boston, London, 1998, 435-436.

#### 作者简介



魏玺章(1976-),男,出生于河北吴桥。2002年12月毕业于国防科技大学信息与通信工程专业获博士学位。现为国防科技大学电子科学与工程学院副教授、硕士生导师。主要研究方向为雷达目标识别、雷达信号处理。

E-mail:liweier@nudt.edu.cn



刘振(1983-),男,出生于江苏泰兴。2008年12月毕业于国防科技大学信息与通信工程专业获硕士学位。现为国防科技大学信息与通信工程专业博士研究生。主要研究方向为雷达波形设计、宽带雷达信号处理。

E-mail:zhen\_liu@nudt.edu.cn



黎湘(1967-),男,出生于湖南浏阳。2002年12月毕业于国防科技大学信息与通信工程专业获博士学位。现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师,中国电子学会高级会员。主要研究方向为空间信息处理、自动目标识别及智能信号处理。

E-mail:xiangli@nudt.edu.cn