

# 毫米波雷达对直升机旋翼回波检测研究

贺治华<sup>1,2</sup>, 王德奇<sup>1</sup>

(1. 中航雷达与电子设备研究院航空电子系统射频综合仿真实验室, 江苏无锡 214063;

2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 针对毫米波雷达直升机旋翼回波信号能量低以至检测困难的问题, 本文根据旋翼回波数学模型分析了旋翼回波、地杂波和目标杂波的时域及频域特性, 提出频域杂波滤除后时域检测的思路. 针对直升机识别应用的现状, 提出通过旋翼回波恒虚警检测保证直升机检测和识别结果信度的思想, 研究了频域杂波滤除后杂波剩余和噪声的统计分布, 引入滑窗检测将观测向量分为检测单元和杂波干扰参考单元以完成旋翼回波的恒虚警检测. 仿真结果表明杂波滤除方法可以有效滤除地杂波和目标杂波, 提高检测时的旋翼回波信杂噪比. 本文设计的旋翼回波时域检测器可以在信杂噪比较低的情况下完成旋翼回波检测.

**关键词:** 直升机旋翼回波; 毫米波雷达; 杂波滤除; 恒虚警检测

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2008) 06-1182-06

## The Research in Detection for Echo of Millimeter Wave Radar from Helicopter Blade

HE Zhi hua<sup>1,2</sup>, WANG De qi<sup>1</sup>

(1. RFSS Radar and Avionics Institute of AVIC, Wuxi, Jiangsu 214063, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** In allusion to energy of echo from rotor blade is too low to be detected, the paper analyses the time characteristic and frequency characteristic of echo from rotor blade, ground clutter and target clutter based math model of echo from rotor blade and the thought of detection for echo from rotor blade in time domain after the clutter is filtered out in frequency domain is brought forward. In allusion to the actuality of recognition for helicopter, the thought of the confident level of helicopter target recognition is guaranteed by controlling the false alarm rate of detection for echo from rotor blade is put forward and statistical distributing of clutter residual and noise after clutter is filtered out in frequency domain is researched and the detection based sliding window is applied to partition the observation vector into the detection cell and reference cell for clutter to accomplish the CFAR detection for echo from rotor blade. The simulation result indicate that the method of filtering clutter can filter the ground clutter and target clutter effectively to improve the detection SCNR of echo from rotor blade. The detector in time domain for echo from rotor blade can work well when the SNCR is low.

**Key words:** echo from helicopter blade; millimeter wave radar; clutter filtered; CFAR detection

## 1 引言

现代战争中, 毫米波雷达对武装直升机的检测与识别十分重要. 直升机都有一个或多个高速转动旋翼, 是其区别于空中其他飞行器的根本特征. 直升机旋翼雷达回波检测是悬停直升机检测和直升机识别的基础.

文献[1~6]对旋翼的雷达回波信号建模与检测进行了研究. 旋翼回波在时域上表现为辛格函数形状的闪烁脉冲, 在频域上存在展宽, 这些特征可用于旋翼回波检测. 闪烁主瓣脉宽与旋翼长度、旋转角速度和雷达波长有关. 当雷达工作在毫米波段时, 包含旋翼回波主要能量的闪烁脉冲主瓣宽度很小, 需要较高脉冲重复频率以采样到闪烁脉冲主瓣, 一般雷达都无法达到. 当雷

达脉冲重复频率较低时, 由于不能稳定采样旋翼闪烁主瓣回波, 使得旋翼回波信噪比及信杂比较低, 造成毫米波雷达对直升机识别和检测的困难.

就旋翼回波检测而言, 直升机身的雷达回波可被视为杂波, 即目标杂波. 旋翼回波时域检测时信号具有最大瞬时功率, 若能有效滤除地杂波和目标杂波, 可以提高旋翼回波检测时的信杂比. 本文采用频域杂波直接抑制并切换到时域进行检测的方法, 确保旋翼回波检测时具有较高的信噪比和信杂比, 获得较好的旋翼回波检测概率和直升机识别率. 本文对频域杂波直接抑制后杂波剩余和噪声的统计分布进行了分析, 给出了旋翼回波时域恒虚警检测处理流程并进行了仿真分析. 通过旋翼回波检测虚警率的恒定可以保证直升机检测识别结果的

信度和稳定性.

## 2 直升机旋翼回波模型

### 2.1 旋翼回波数学模型

远场条件下, 旋翼桨片可以等效为一定长度的理想线源, 以一定速度绕叶毂中心点旋转. 旋翼叶毂中心点与雷达距离为  $R$ , 如图 1 所示.  $\varphi$  是雷达入射波束与旋翼旋转平面的夹角,  $\theta$  是旋翼桨片法线方向与波束在旋翼旋转平面投影的夹角,  $r$  是桨片内端至叶毂中心点的长度,  $l$  是桨片外端至叶毂中心点的长度.

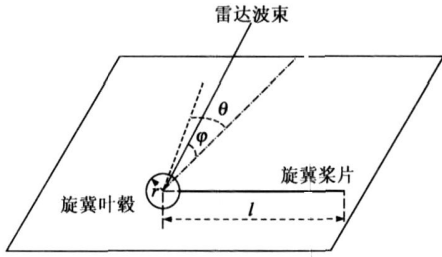


图 1 旋翼桨片与雷达波束的几何关系

单根旋翼桨片回波由旋翼桨片上各点回波相干叠加而成, 当旋翼有  $N$  根桨片时, 其总回波信号可表示为:

$$v_w = (l - r) \sum_{n=0}^{N-1} A_n B_n \quad (1)$$

其中

$$A_n = \exp \left\{ j2\pi \left[ \frac{c}{\lambda} l - \frac{2(R - Vt)}{\lambda} + \frac{(l + r) \sin(\theta_n + 2\pi F_{rot} t) \cos(\varphi)}{\lambda} \right] \right\} \quad (2)$$

$$B_n = \text{sinc} \left[ \frac{2(l - r) \sin(\theta_n + 2\pi F_{rot} t) \cos(\varphi)}{\lambda} \right] \quad (3)$$

$$\theta_n = \theta_0 + \frac{(n - 1) 2\pi}{N} \quad (4)$$

其中  $\theta_n$  是旋翼第  $n$  个桨片初始相位角,  $\lambda$  是入射波长,  $V$  为直升机的径向速度,  $F_{rot}$  旋翼的旋转角速度.

### 2.2 旋翼回波特性分析

由于旋翼桨片旋转对雷达反射回波的相位调制效应, 旋翼回波在时域上表现为周期性闪烁脉冲, 闪烁周期由旋翼旋转频率和旋翼桨片数目确定; 频域存在多普勒展宽, 展宽大小除与入射波长、旋翼旋转速度和旋翼长度有关外, 还与采样起始时刻和时间长度相关.

旋翼回波闪烁脉冲的 3dB 主瓣时宽为

$$\Delta T = \frac{0.443 k \lambda}{4\pi F_{rot} (l - r)} \quad (5)$$

当桨片数目  $N$  为奇数时,  $k = 2$ ; 当  $N$  为偶数时,  $k = 1$ . 旋翼回波闪烁周期为

$$T_p = \frac{1}{kNF_{rot}} \quad (6)$$

## 3 直升机旋翼回波时域检测

### 3.1 直升机旋翼回波检测

脉冲多普勒雷达的直升机回波中频采样主要由机身回波、旋翼回波、地杂波和接收机热噪声四部分构成. 机身回波属于普通雷达目标回波, 其 RCS 起伏可认为符合 Swerling 模型. 旋翼回波与符合 Swerling 模型的普通雷达目标回波相比有很大差别. 首先, 在雷达照射期间普通雷达目标回波是持续的, 即使起伏也是一个随机过程, 而旋翼回波为周期性小时宽闪烁脉冲, 脉峰过后迅速衰减, 在下一个闪烁脉冲出现之前几乎没有旋翼回波能量; 其次, 普通雷达目标回波在多普勒频域相参积累为一个具有较大能量的谱峰, 而旋翼回波的多普勒频谱具有分布在一定频带上的展宽. 可以得出这样的结论: 普通雷达目标的回波能量在时域上是持续的, 在多普勒频域上是积累集中的; 与此相反, 旋翼回波能量在时域上是短暂闪烁的, 而在多普勒频域上是分散的. 由此可知, 在频域进行杂波滤除并在时域完成旋翼回波信号检测可充分利用旋翼回波与杂波在时域和频域的特性, 改善旋翼回波的检测能力, 处理流程如图 2 所示. 根据旋翼回波的时域特性设置检测单元和参考单元, 通过估计参考单元中杂波剩余和噪声的功率水平实现旋翼回波恒虚警检测.

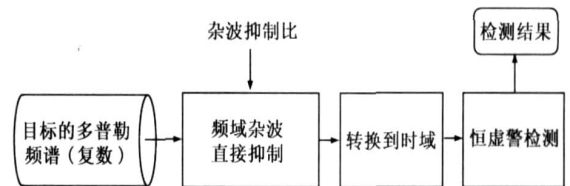


图 2 旋翼回波时域恒虚警检测处理流程

旋翼回波检测的关键和前提是能够采样到有效旋翼回波, 具有一定信噪比和信杂比. 根据旋翼回波周期闪烁特性, 有效采样对雷达的波束驻留时间和脉冲重复频率提出较高要求: 应保证波束驻留时间大于闪烁脉冲周期, 由脉冲重复频率决定的脉冲重复周期小于旋翼回波闪烁脉冲的 3dB 脉宽.

旋翼回波检测可以表示为如下二元假设检验问题:

$$H_0: r(i) = h(i) + g(i) + n(i)$$

$$H_1: r(i) = u(i) + h(i) + g(i) + n(i)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中  $H_0$  表示回波采样中没有旋翼回波,  $H_1$  则表示回波采样含有旋翼回波. 雷达每工作周期发射  $N$  个相参子脉冲, 回波采样为一组观测  $R = \{r(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ ,  $r(i)$  是雷达第  $i$  个相参子脉冲回波采样,  $u(i)$  为其中的旋翼回波分量,  $g(i)$  是地杂波分量,  $h(i)$  为目标杂波分量,  $n(i)$  是热噪声分量. 当该检测距离上有直升机

时,目标杂波即为机身回波;当存在非直升机目标时,目标杂波就是该目标回波;当不存在目标时,目标杂波为零.旋翼回波检测是通过比较观测  $R$  与设定检测阈值的  $H_0$  或  $H_1$  成立.

### 3.2 杂波滤除

由于在时域无法确定目标杂波频率中心和谱宽且杂波能量不集中,所以杂波滤除需在多普勒频域进行.根据杂波与旋翼回波频域分布特性,杂波能量集中在频域的一个较窄范围;当雷达脉冲重复频率不高时,旋翼回波分散到了整个频谱.频域杂波直接抑制是通过多普勒频谱估计出杂波谱的中心频率和谱宽,根据给定的杂波抑制比将杂波分布范围内的多普勒谱线直接抑制为零<sup>[7]</sup>.由于杂波能量在频域较集中,故频域杂波直接抑制对旋翼回波能量损失不大.杂波抑制谱各通道包括旋翼回波、热噪声、地杂波剩余和目标杂波剩余的能量.其处理流程如图 3 所示.

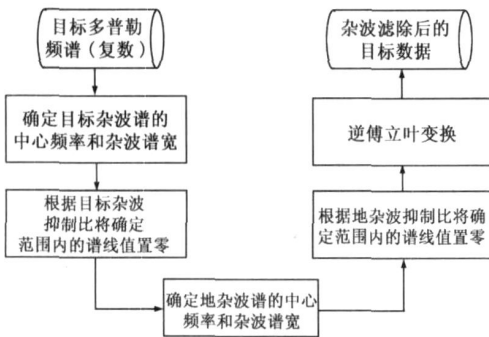


图 3 杂波滤除处理流程

杂波滤除受杂波抑制比的影响较大.当杂波抑制比增大时,被抑制为零的多普勒谱线增多,杂波剩余能量变小,旋翼回波能量损失增大.当杂波抑制比减小时,被抑制为零的多普勒谱线数减小,杂波剩余能量变大,旋翼回波能量损失减小.

由于旋翼回波在时域上表现为闪烁脉冲,通过逆傅立叶变换将杂波抑制谱转换到时域,相当于对旋翼回波进行相参积累,将其主要能量集中闪烁脉冲峰内,提高了检测时的旋翼回波信噪比和信杂比.

### 3.3 旋翼回波时域恒虚警检测

旋翼回波时域检测是确定观测向量中旋翼回波闪烁脉冲是否存在的过程.旋翼回波检测通过设置滑窗检测单元以确定整个观测向量上是否存在一个单元包含旋翼回波采样.根据检测单元附近噪声与杂波的功率水平、统计分布和设定虚警率确定检测门限,使旋翼回波时域检测虚警率保持恒定.

#### 3.3.1 杂波剩余及旋翼回波的时域统计特性

直升机雷达回波经杂波滤除处理后,主要由地杂波剩余、目标杂波剩余、热噪声和直升机旋翼回波组成.接收机热噪声服从高斯分布;本文假定地杂波服

从高斯分布,机身目标杂波幅度起伏符合 Swerling I 模型.通常可假设,当相参积累脉冲数较大,杂波抑制比指标较高且去除置零后的杂波区时,频域杂波直接抑制处理是一个白化过程,杂波抑制谱各通道杂波剩余的统计特性接近于高斯白噪声.经逆傅立叶变换后,可认为热噪声和杂波剩余之和服从高斯分布,其包络服从 Reyleigh 分布.

$$f_n(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{x}{2\sigma}\right] \quad (8)$$

如前所述,每工作周期雷达  $N$  个脉冲回波采样至多有一个脉冲重复周期采样含有旋翼回波信号.由于雷达的脉冲重复周期和直升机旋翼旋转周期是参差的,故可认为旋翼回波信号采样脉冲在旋翼回波闪烁脉冲主瓣附近的采样时间  $t$  服从均匀分布.若  $t=0$  时旋翼回波采样为闪烁脉冲主瓣的脉峰,则  $t$  的概率密度函数为

$$p_t(x) = \begin{cases} 0, & x < -\frac{\text{PRI}}{2} \\ \frac{1}{\text{PRI}}, & -\frac{\text{PRI}}{2} \leq x \leq \frac{\text{PRI}}{2} \\ 0, & x > \frac{\text{PRI}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

设旋翼回波闪烁脉冲峰值采样为  $A'$ , 包络函数为  $A = A' \left| \text{sinc} \left[ 2 \left( f_0 + \frac{1}{2} Kt \right) L_1 \sin(\theta_1 + 2T_{rot}t) / c \right] \right|$  (10)

$A$  是一个随机变量,由于无法求解其概率密度函数的解析形式,可通过数值求解拟合.采用蒙特卡罗仿真方法,仿真次数为 10000 次.其中  $A' = 10$ , 脉内调频斜率为  $K = 1 \times 10^{12} \text{ Hz/s}$ , 其余参数设置与第 4 节中的仿真参数设置相同,旋翼回波包络采样的概率分布函数如图 4 所示.

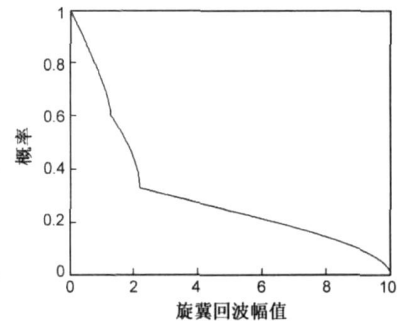


图 4 旋翼回波包络采样的概率分布函数

旋翼回波的包络幅值即为旋翼回波信号能量,可以得到旋翼回波检测信噪比和信杂比的概率分布.

#### 3.3.2 旋翼回波时域恒虚警检测流程

旋翼回波检测的输入是由  $N$  个相参子脉冲在检测距离处杂波滤除后的时域数据.毫米波雷达旋翼回波闪烁脉冲衰减很快,每工作周期至多有一个子脉冲采样到能量较高的旋翼回波,可作为旋翼回波检测单元;其他  $N-1$  子脉冲可认为不含有旋翼回波,包含各种杂波干扰,可作为杂波干扰功率水平估计的参考单元.其检测流程图如图 5 所示.

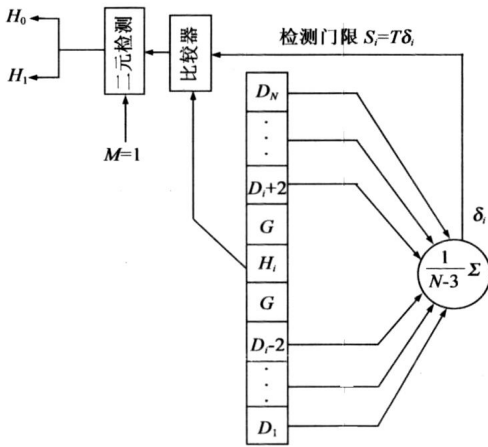


图 5 旋翼回波时域恒虚警检测流程图

在观测向量上设置滑窗作为检测单元, 检测单元前后各设置一个保护单元, 防止旋翼回波能量泄漏到参考单元. 搜索范围是整个观测向量, 最后  $N$  个检测结果作二元检测, 检测门限为 1. 观测向量中其余  $N-3$  观测值可以作为热噪声及杂波剩余参考单元, 通过单元平均 (CA) 方法估计热噪声及杂波剩余 Rayleigh 分布参数  $\hat{\delta}$ . 旋翼回波滑窗检测单元  $H_i$  的二元检测第一门限为

$$S_i = T\hat{\delta}_i \quad (11)$$

其中  $T$  为标称化因子. 由于热噪声及杂波剩余之和包络服从瑞利分布, 则

$$T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln(P_{fa}^{-1})} \quad (12)$$

其中  $P_{fa}$  是设定的虚警率.

#### 4 仿真实验与分析

本文采用仿真数据验证杂波滤除和旋翼回波时域检测器的性能. 假定地杂波干扰和热噪声服从高斯分布, 目标杂波符合 Swerling I 模型, 每相参工作周期 (CPI) 包括 256 个脉冲回波采样. 雷达工作波长为 0.008m, 载机速度 15m/s, 脉冲重复频率为 40kHz, 目标速度为 65m/s, 旋翼桨片长度 6.7m, 旋转频率 5Hz.

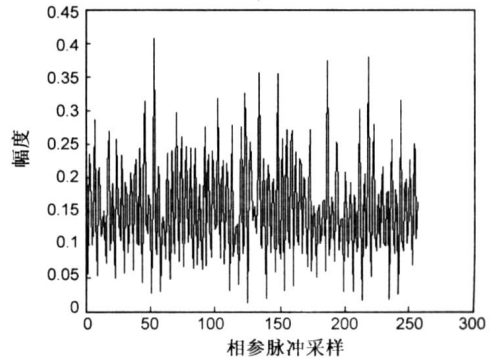
旋翼回波信杂噪比定义为旋翼回波信号峰值功率 (即回波闪烁最强时功率) 与杂波噪声平均功率之比.

$$SCNR = 10 \log_{10} \frac{\max(|u(k)|^2)}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |n(k) + h(k) + g(k)|^2} \quad (13)$$

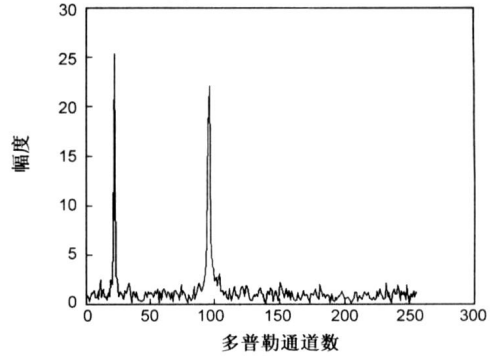
##### 实验一: 杂波滤除性能

实验一按设定参数生成雷达回波, 使用本文提出的杂波滤除方法, 比较杂波滤除前后旋翼回波信杂噪比的变化, 地杂波与目标杂波的杂波抑制比均设为 30dB. 如图 6(a) 为直升机雷达仿真回波数据, 包括直升机旋翼回波、机身回波、地杂波和高斯白噪声四个部分, 其中目标杂波与地杂波之比 TCR 为 0dB, 噪声与地

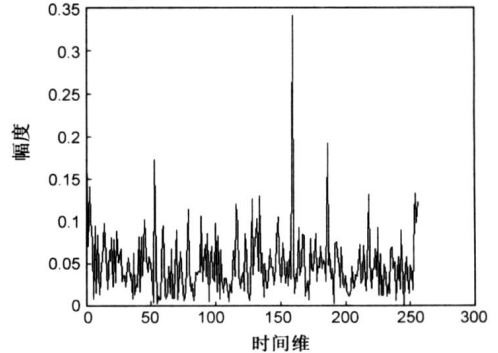
杂波之比 NCR 为 -10dB, 旋翼回波信号与杂波噪声比 SCNR 是 5dB. 由于杂波和噪声的扰动, 无法从仿真回波中确定旋翼回波闪烁的是否存在. 图(b)是原始回波的多普勒频谱, 频域的两个脉峰分别为地杂波和目标杂波, 旋翼回波信号则展宽在整个多普勒频域. 图(c)是



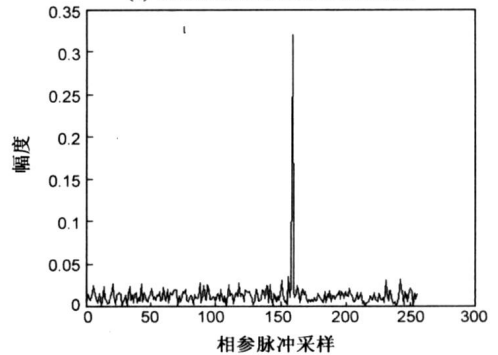
(a) 直升机的雷达仿真回波



(b) 直升机雷达仿真回波的多普勒频谱



(c) 杂波滤除后转换到时域的数据



(d) 旋翼回波与高斯白噪声的叠加

图 6 直升机雷达仿真回波及杂波滤除

经杂波滤除后转换到时域的数据,可以看出杂波电平较图(a)低,与图(d)比较可知,其中最高峰为旋翼回波闪烁脉峰,可以确定是旋翼回波闪烁。

表1和表2是在SCNR=5dB时杂波滤除后SCNR均值和方差,蒙特卡罗仿真次数为100。由于杂波滤除对噪声的影响较小,可以看出随雷达仿真回波噪声比NCR的增加,杂波滤除输出SCNR在减小。随TCR的增加杂波滤除输出SCNR在增大,这是由于地杂波在各次

相参脉冲回波采样是相互独立的高斯随机变量,杂波滤除后的地杂波剩余较大;目标杂波在各次相参脉冲回波的采样是相关的,杂波滤除后的杂波剩余小。可以看出通过杂波滤除可以使检测时的旋翼回波信杂噪比平均提高5dB,这提高旋翼回波检测概率。表2显示了杂波滤除的效果在各次仿真间存在波动,波动范围在1dB至2dB,这是由于噪声和杂波的不确定性引起的。

表1 杂波滤除后SCNR均值(单位: dB, 输入SCNR=5dB)

噪声比(dB)	TCR= -10dB	TCR= -6dB	TCR= -2dB	TCR= 2dB	TCR= 6dB
-20	11.097	12.008	12.739	14.447	16.232
-16	10.996	11.526	12.262	13.786	16.159
-12	10.455	11.278	12.225	13.32	15.458
-8	9.7281	10.211	10.959	12.403	14.877
-4	9.0325	9.4323	9.5769	11.023	12.97
0	8.2263	8.4812	9.066	9.3217	11.091

表2 杂波滤除后SCNR方差(单位: dB, 输入SCNR=5dB)

噪声比(dB)	TCR= -10dB	TCR= -6dB	TCR= -2dB	TCR= 2dB	TCR= 6dB
-20	3.0807	2.3341	1.9275	1.9463	1.2769
-16	2.1299	2.1662	2.3901	2.0691	1.1194
-12	2.816	1.9444	2.6032	2.3658	1.4505
-8	2.6674	2.5138	2.7734	2.6504	1.1752
-4	1.8566	1.9253	2.6455	2.3419	2.3209
0	1.3483	1.3949	2.2351	2.4803	2.5283

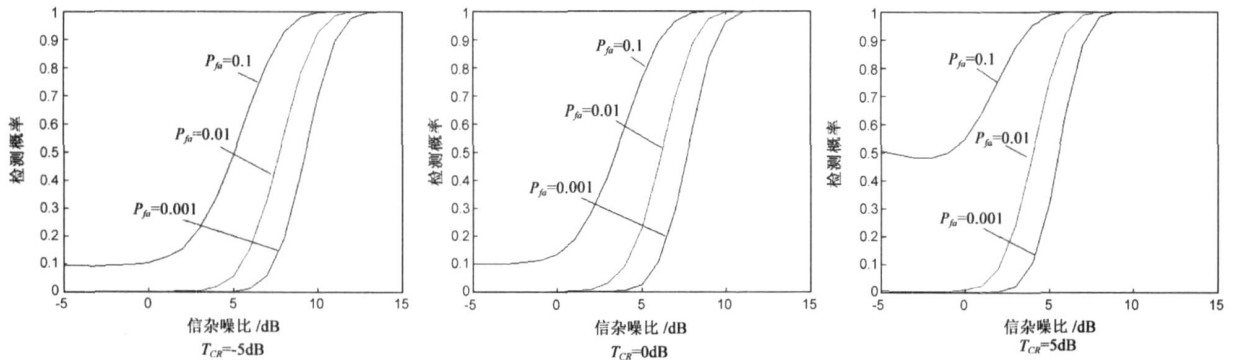


图7 旋翼回波时域检测器检测性能曲线

实验二: 旋翼回波时域检测器性能测试

为检验旋翼回波时域检测器抗干扰能力,在仿真旋翼回波数据中加入不同信杂噪比的杂波和噪声,测试旋翼回波时域检测器对旋翼回波的检测性能。实验中杂波抑制比指标为30dB, NCR= -10dB, 蒙特卡罗仿真次数为10000。

图7是检测器在三种不同虚警概率情况下( $P_{fa}$  = 0.1, 0.01和0.001)的检测性能曲线。可以看出该检测

器能够在较低信杂噪比下检测出旋翼回波。与实验一结论相同,频域杂波滤除对目标杂波的抑制效果与地杂波相比要好,所以当TCR增加时,目标杂波所占比例增大,杂波滤除后杂波剩余能量较小,使得同一虚警率下旋翼回波的检测概率增大。由此可知,直升机飞行高度越低,其毫米波雷达检测概率越低。

5 结束语

毫米波雷达对悬停直升机的检测和运动直升机识

别的难点是旋翼回波的信噪比和信杂比很低. 本文根据直升机旋翼回波、地杂波和目标杂波在时域和频域的能量分布特性, 提出频域杂波滤除后时域检测思路, 在较好的抑制杂波的情况下使检测时的旋翼回波瞬时功率最大. 本文提出采用旋翼回波恒虚警检测以保证悬停直升机检测和直升机识别结果的信度, 对杂波抑制后的杂波剩余及热噪声统计分布进行分析, 引入单元平均(CA)方法对旋翼回波恒虚警检测进行了仿真.

旋翼回波的有效检测取决于雷达的波束驻留时间和脉冲重复频率, 当雷达工作在毫米波段时, 所需的脉冲重复频率较高, 这样观测向量包含的脉冲数较多. 旋翼回波时域检测准则是确定观测时间内是否存在一个较高的旋翼回波闪烁脉峰. 设定虚警率情况下, 观测向量越长, 检测门限越高, 导致检测概率越低. 这是影响旋翼回波检测概率重要因素, 如何克服还有待于研究.

#### 参考文献:

- [1] J Misiurewicz, et al. Analysis of Recorded Helicopter Echo [A]. Proc of IEE Radar' 97[C]. Edinburg UK: IEE, Radr, 1997. 449- 451.
- [2] V C Chen. Radar signatures of rotor blades[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4391: 63- 70.
- [3] 李道京. 悬停直升机探测问题的研究[J]. 雷达与对抗, 1997, (3): 1- 6.  
LI Dao jing. Radar detection of hovering helicopter[J]. Radar & ECM, 1997, (3): 1- 6. (in Chinese)
- [4] 杜兰, 保铮, 邢孟道. 直升机雷达回波的分析与检测[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(5): 574- 579.  
DU Lan, BAO Zheng, XING Meng dao. Analysis and detection of radar echoes from helicopters[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(5): 574- 579. (in Chinese)
- [5] 孙文峰, 张晨, 王永良. 悬停直升机的雷达探测技术[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 896- 899.  
SUN Werr feng, ZHANG Chun, WANG Ying liang. Radar Detection of Hovering Helicopter[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 896- 899. (in Chinese)
- [6] 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 Zi yue, WANG Ying liang, JIANG Xing zhou. Radar detection of hovering helicopter[J]. Modern Radar, 2000, 22(1): 15- 19. (in Chinese)
- [7] 徐俊毅, 王秀坛, 彭应宁. ATMD 系统频域双参数恒虚警性能分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(7): 945- 948.  
XU Jur yi, WANG Xir tan, PENG Ying ning. Performance analysis of frequency domain BP CFAR in AMTD systems[J]. JTsinghua Univ( Sci & Tech), 2002, 42(7): 945- 948. (in Chinese)
- [8] 何友, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社. 1999.

#### 作者简介:



贺治华 男, 1973 年生于河北沧州, 2005 年在国防科技大学电子工程学院获得博士学位. 现正在中航雷达与电子设备研究院做博士后. 研究兴趣是信号处理、雷达自动目标识别.

E-mail: zhhe1@tm.com