

## 基于盲数理论的空中目标粗分类

陈行勇 魏玺章 黎湘 郭桂蓉

(国防科技大学空间电子信息技术研究所 长沙 410073)

**摘要** 该文首先总结了直升机目标雷达探测和识别的难点,然后分析了直升机目标雷达回波信号频谱调制特征,给出了直升机回波频谱宽度的估算式。以频谱宽度为特征,引入盲数理论,对直升机和固定翼飞机进行初步分类,并给出了仿真试验结果。试验结果证明了该文的理论分析和分类算法。

**关键词** 空中目标分类,直升机,多普勒频谱,盲数

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0322-04

## Rough Classification of Air-Target with the Theory of Blind Number

Chen Hang-yong Wei Xi-zhang Li Xiang Guo Gui-rong

(Research Institute of Space Electronics Information Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** This paper first summarizes the difficulty in detecting and identifying helicopter, then analysis the spectrum signature of radar echo signal from helicopter, and estimates the width of the spectrum modulated by helicopter blades. The author uses the width of the spectrum and applies the theory of blind number to a rough classification of helicopter and fixed-wing aircraft. The author provides the result of emulation, and the result proves the effectiveness of theoretic analyses and the algorithm of classification.

**Key words** Classification of air-target, Helicopter, Doppler spectrum, Blind number

### 1 引言

由于武装直升机载有下射机炮、空地导弹、反雷达导弹、反坦克导弹等武器装备,并有低空飞行、悬停、利用地形或森林隐蔽等机动灵活的优点,可用于攻击炮群、坦克和地面部队等目标,对这些目标构成了极大的威胁,在现代战争中发挥着重要作用,因此探测和识别武装直升机对于现代战争的战场侦察非常重要。

目前对于武装直升机的识别是雷达目标识别的一个难点。绝大多数文献研究的都是基于时域回波信号特征的方法。武装直升机的旋翼对雷达照射产生的回波会产生多普勒频谱展宽。对于空中战场侦察,利用此特征可以识别直升机目标和固定翼飞机目标。然而在实战环境下,由于空中目标参数是未知的,并且它们相对雷达的运动也是时变的、不确定的,导致回波的多普勒频谱是不确定的。若雷达照射方向接近于垂直旋转平面,则回波多普勒频谱几乎无展宽,信号时域特征和频域特征与固定翼飞机几乎无区别,由此可知由于目标信息的不确定性,使得利用旋翼对信号的调制来识别目标的方法必存在不确定性。对这种不确定性信息的有效处理是利用多普勒频谱特征识别直升机目标的关键。

时域法检测直升机的基本原理是检测由于旋翼调制产生的回波信号尖峰。时域法最大的问题在于通常难以采样到回波信号的尖峰。本文首先给出了直升机对单频信号回波谱宽的近似计算公式,然后利用盲数的BM模型,研究了利用谱宽对空中目标粗分类的方法。

### 2 旋翼回波信号频谱展宽估计

文献[1-3]分析了直升机旋翼的旋转对目标回波的调制效应,这种调制主要体现在回波的幅度和频率变化上。本文采用文献[4]给出的回波模型。假定叶片是雷达远场区的刚性线目标,忽略叶片和机身间遮挡影响,设发射信号为  $u_s = \exp(j\omega t)$ , 则回波信号为

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

其中

$$A_n = \exp \left\{ j \left[ \omega t - \frac{4\pi}{\lambda} (R-vt) + \frac{2\pi}{\lambda} (l+r) \cos \alpha \sin(\theta_n + 2\pi f_{rot} t) \right] \right\} \quad (2)$$

$$B_n = \text{sinc}[(2/\lambda)(l-r)\cos\alpha\sin(\theta_n + 2\pi f_{rot} t)] \\ = \frac{\sin[(2/\lambda)(l-r)\cos\alpha\sin(\theta_n + 2\pi f_{rot} t)]}{(2/\lambda)(l-r)\cos\alpha\sin(\theta_n + 2\pi f_{rot} t)} \quad (3)$$

2004-08-02 收到, 2005-07-27 改回

国家部级基金资助课题

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

其中  $\omega$  为雷达工作角频率,  $\lambda$  为工作波长,  $f_{\text{rot}}$  为旋翼转速,  $l$  为叶片长度,  $r$  为转轴半径,  $\theta_0$  为叶片法向与波束的夹角,  $R$  为雷达相位中心至直升机转轴中心的距离,  $v$  为直升机径向运动速度,  $N$  为叶片数,  $\alpha$  为雷达波束与叶片旋转平面的夹角, 即入射角。本文主要分析主旋翼多普勒频谱, 为便于分析令  $\omega_1 = 2\cos\alpha(l-r)/\lambda$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_{\text{rot}}$ ,  $\omega_3 = 2\cos\alpha(l+r)/2$ 。式(2)中  $\exp\{j[\omega t - \frac{4\pi}{\lambda}(R-vt)]\}$  对  $A_n$  频谱的作用为常数频移, 常量  $\theta_n$  相当于时延, 对  $A_n$  频谱形状分析无影响, 为简化计算可令  $\theta_n = 0$ , 则式(2)可表示为  $g(t) = \exp(\omega_3 \sin(\omega_2 t))$ ; 同理在式(3)中也可令  $\theta_n = 0$ , 则式(3)可表示为  $f(t) = \sin[\omega_1 \sin(\omega_2 t)] / (\omega_1 \sin(\omega_2 t))$ , 若  $\omega_2$  不是很大, 当  $t \rightarrow 0$  时, 有  $\sin(\omega_2 t) \approx \omega_2 t$ ,  $f(t) \approx \sin(\omega_1 \omega_2 t) / (\omega_1 \omega_2 t)$ ; 单个叶片的回波信号为  $s(t) = (l-r)f(t)g(t)$ 。傅里叶核  $f(t)$  的频谱为

$$F(\omega) = F[f(t)] = \begin{cases} \frac{\pi}{\omega_1 \omega_2}, & |\omega| \leq \omega_1 \omega_2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其带宽  $W_f = 2\omega_1 \omega_2$ 。将  $g(t)$  展开成泰勒级数得

$$g(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\omega_3^n \sin^n(\omega_2 t)}{n!} \quad (6)$$

由  $\lim_{n \rightarrow \infty} \omega_3^n / n! = 0$  可知, 当  $\omega_3$  不是很大时,  $g(t)$  可用其级数的前有限项近似

$$g(t) \approx \sum_{n=0}^k \frac{\omega_3^n \sin^n(\omega_2 t)}{n!} \quad (7)$$

设  $\sin \omega_2 t$  的傅里叶变换为  $F[\sin \omega_2 t]$ , 而  $\sin^n \omega_2 t$  的傅里叶变换为  $F[\sin \omega_2 t]$  自身的  $n$  重卷积, 其频谱仍为线谱, 因此  $g(t)$  的频谱为有限个同频率线谱的线性叠加, 也为频率为  $\omega_2$  的线谱。 $g(t)f(t)$  的傅里叶变换与  $f(t)$  的傅里叶变换相比仅有频移, 因此  $s(t) = (l-r)f(t)g(t)$  的频谱宽度等于  $f(t)$  频谱宽度。由以上推导得  $s(t)$  的频谱宽度的近似计算式为

$$W_s \approx W_f = 2\omega_1 \omega_2 = 2 \cdot \frac{2(l-r)\cos\alpha}{\lambda} \cdot 2\pi \cdot f_{\text{rot}} = \frac{8\pi(l-r)f_{\text{rot}}\cos\alpha}{\lambda} \quad (8)$$

式(8)说明, 直升机单个叶片雷达回波信号频谱展宽由叶片电磁散射有效长度  $l-r$ , 旋翼转速  $f_{\text{rot}}$ , 入射角  $\alpha$  和发射信号波长  $\lambda$  决定。由于直升机回波信号只是周期信号  $s(t)$  的移位后的线性组合, 故其近似频谱展宽仍为  $W_s$ , 由此最后得在转速和叶片长度有限时, 直升机回波信号的近似频谱展宽为

$$W_u = W_s = \frac{8\pi(l-r)f_{\text{rot}}\cos\alpha}{\lambda} \quad (9)$$

典型的含加性高斯噪声的旋翼回波信号和固定翼回波信号仿真频谱如图 1 和图 2 所示。固定翼飞机回波信号的理论频谱为线频, 但由于固定翼飞机各强散射点径向速度有微小差异, 且存在涡喷发动机调制效应 JEM(Jet Engine Modulation), 其频谱也有一定展宽。利用单频发射信号遇到空中目标的回波信号频谱特征可对空中目标进行粗分类, 最简单的特征就是频谱展宽。

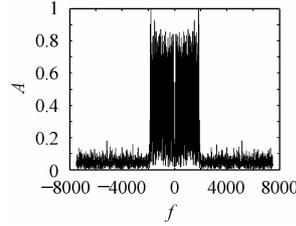


图 1 典型的旋翼回波信号频谱  
Fig.1 Classical spectrum of echo from blades

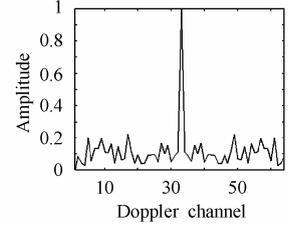


图 2 典型的固定翼飞机回波信号频谱  
Fig.2 Classical spectrum of echo from a fixed-wing aircraft

由于实际的直升机回波信号并不是严格的 sinc 函数形式, 并且回波模型未考虑叶片间的反射和尾翼回波成分, 故其多普勒频谱边界不是很明显。为验证本文给出的多普勒频谱展宽近似计算式, 设实际输出的离散多普勒频谱为  $U_r(k)$ , 定义展宽  $\Delta\omega$ : 对  $k > 0$ , 若  $U_r(k) > 20U_r(k+1)$ , 则  $\Delta\omega = 2 \cdot k$ 。表 1 和表 2 分别比较了当  $l = 6.705\text{m}$ ,  $r = 0.205\text{m}$ ,  $f_{\text{rot}} = 4.5$ , 而照射角和波长不同时本文公式和采用傅里叶变换分析的计算结果。从两表的数据可以得知, 本文给出的理论展宽估计式与实际展宽相比误差不大。

表 1  $\alpha$  不同时的仿真结果 ( $\lambda = 0.2\text{m}$ )

Table 1 Simulation results with different  $\alpha$

$\alpha(^{\circ})$	0	10	30	45
$\Delta\omega$	3590	3590	3230	2330
$W_u$	3650	3595	3161	2581
$ W_u - \Delta\omega /\Delta\omega$	1%	0.1%	2%	10%

表 2  $\lambda$  不同时的仿真结果 ( $\alpha = 0^{\circ}$ )

Table 2 Simulation results with different  $\lambda$

$\lambda$	0.002	0.02	0.05	0.2
$\Delta\omega$	380050	38150	15290	3590
$W_u$	365020	36502	14601	3650
$ W_u - \Delta\omega /\Delta\omega$	4%	4%	5%	1%

### 3 基于盲数理论的回波多普勒频谱特征分析

1965年美国学者Zaden创建了模糊集合论, 给出了模糊信息的概念, 发展了不确定性的研究领域。1982年由我国邓

聚龙教授创立了灰色系统理论,在此基础上建立了灰色集合,产生了灰色数学。1990年由我国工程院院士王光远教授提出了未确知信息,产生了未确知数学。1991年王清印,刘志勇建立了泛灰集,使之包含了以上所有类型的不确定性信息。盲数用来描述同时具有随机、未确知、模糊和灰等不确定性的信息。限于篇幅,更加详细的盲数理论可见文献[5]。

### 3.1 盲数模型

直升机旋翼转速一般在4~6Hz之间,叶片长度一般为 $7 \pm 10\%$  m,一般为0.2~0.3m,的取值可为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。在实际的战场环境侦察中,当机载相控阵雷达探测目标时,它们都是不确定的。定义盲数<sup>[5]</sup>如下:

旋翼转速  $A = f_{\text{rot}}$  (Hz)为

$$f_1(x) = \begin{cases} 1, & x = [4, 6] \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

叶片长度  $B = l$  (m)为

$$f_2(x) = \begin{cases} \delta, & x = 6.3 \\ 1 - 2\delta, & x = 7 \\ \delta, & x = 7.7 \end{cases} \quad (11)$$

转轴半径  $C = r$  (m)

$$f_3(x) = \begin{cases} 1, & x = [0.2, 0.3] \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

$D = \cos \alpha$  为

$$f_4(x) = \begin{cases} \beta, & x = \left[ \frac{\sqrt{3}}{2}, 1 \right] \\ 1 - \beta, & x = \left[ 0, \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \end{cases} \quad (13)$$

考虑到叶片长度最大值与最小值差的绝对值相对于其均值较小,为简化计算,其盲数取3个典型值,叶片长度取值的不确定性由这3个典型值代表,误差不会很大。机载相控阵雷达探测目标时,一般情况下,直升机开始距离雷达很远, $\alpha = 0^\circ$ ,运动至 $\alpha = 30^\circ$ 时,直升机相对机载雷达可视为远场目标。当 $\cos \alpha$ 在 $\left[ \frac{\sqrt{3}}{2}, 1 \right]$ 上取值时,使用粗分类法和更加精确的识别法识别出目标的可能性很大,在探测目标时,出现 $\alpha$ 大于 $30^\circ$ 的可能性较小,故认为盲数 $D$ 取值靠近最大值1的可信度较大。 $\delta$ 和 $\beta$ 可根据以往战场侦察的经验来选取。令 $E = A(B - C)D$ , $k = 8\pi/\lambda$ ,定义直升机回波频谱宽度盲数为

$$W = \frac{W_u}{k} = A(B - C)D \quad (14)$$

### 3.2 粗分类算法

空中目标粗分类主要目的是利用谱宽,快速识别直升机目标。对于受运动状态和环境影响不易识别的目标,为后续精确识别算法提供参考。以谱宽为特征,基于盲数理论对空中目标粗分类的算法如下:

(1)根据经验和实际战场环境如敌军经常出动的飞机的参数和方向选择 $\delta$ 和 $\beta$ ;

(2)选择直升机可信度门限 $\eta_1$ ,直升机可信度门限可选择 $\eta_1 = 85\% \sim 100\%$ ,计算使 $P(W \geq W_1) > \eta_1$ 的 $W_1$ ;

(3)对实际的回波信号计算谱宽 $W_u \lambda / (2\pi)$ ,若 $W \geq W_1$ 认为目标是直升机;

(4)固定翼飞机由于存在涡喷发动机调制效应JEM(Jet Engine Modulation),回波信号频谱也存在较小展宽,并且由ISAR成像原理可知,固定翼飞机在转向时也存在多普勒频谱展宽,但固定翼飞机的频谱展宽难以定量分析,故可取 $W_2 = \rho W_1$  ( $0 < \rho < 1$ ), $\rho$ 为根据实际战场环境选择的门限,若 $W \leq W_2$ 认为目标是固定翼飞机,否则粗分类失效,留待细分类算法判决识别。

### 3.3 仿真计算

取 $\delta = 1/3$ , $\beta = 3/4$ ,由盲数的减法运算得 $B - C$ 为

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} 1/5, & x = [6.0, 6.1] \\ 3/5, & x = [6.7, 6.8] \\ 1/5, & x = [7.4, 7.5] \end{cases} \quad (15)$$

由盲数的乘法运算得 $A(B - C)$ <sup>[5]</sup>为

$$\varphi_2(x) = \begin{cases} 1/5, & x = [24, 36.6] \\ 3/5, & x = [26.8, 40.8] \\ 1/5, & x = [29.6, 45] \end{cases} \quad (16)$$

由于上面取值区间有相交,以长度为权系数,将其划分为互不相交的区间得

$$\varphi_2(x) = \begin{cases} \frac{1}{5} \times \frac{2}{9}, & x = [24, 26.8] \\ \frac{1}{5} \times \frac{2}{9} + \frac{3}{5} \times \frac{1}{5}, & x = [26.8, 29.6] \\ \frac{1}{5} \times \frac{5}{9} + \frac{3}{5} \times \frac{1}{2} + \frac{1}{5} \times \frac{5}{11}, & x = [29.6, 36.6] \\ \frac{3}{5} \times \frac{3}{10} + \frac{1}{5} \times \frac{3}{11}, & x = [36.6, 40.8] \\ \frac{1}{5} \times \frac{3}{11}, & x = [40.8, 45] \end{cases} \quad (17)$$

最后得 $A(B - C)$ 和 $D$ 的可能值带边积矩阵和可信度带边积矩阵分别示于表3和表4。

表3  $A(B - C)$ 和 $D$ 的可能值带边积矩阵

Table 3 Probability matrix of  $A(B - C)$  and  $D$

[24.0,26.8]	[0,23.2]	[20.8,26.8]
[26.8,29.6]	[0,25.6]	[23.2,29.6]
[29.6,36.6]	[0,31.7]	[25.6,36.6]
[36.6,40.8]	[0,35.3]	[31.7,40.8]
[40.8,45.0]	[0,39.0]	[35.3,45.0]
+	$\left[ 0, \frac{\sqrt{3}}{2}, 1 \right]$	$\left[ \frac{\sqrt{3}}{2}, 1 \right]$

表4  $A(B-C)$  和  $D$  的可信度带边积矩阵

Table 4 Credibility matrix of  $A(B-C)$  and  $D$

0.0444	0.0111	0.0333
0.1644	0.0411	0.1233
0.5020	0.1255	0.3765
0.2345	0.0586	0.1758
0.0545	0.0136	0.0408
×	0.25	0.75

取  $\lambda = 0.2\text{m}$ ，得  $k = 126$ ，由表4可得旋翼回波信号频谱宽度不低于2000Hz的可能性为

$$P(W_u \geq 2000) = P(W \geq 2000/126 = 15.9)$$

$$\geq 1 - \left( 0.0111 \times \frac{15.9}{23.2} + 0.0411 \times \frac{15.9}{25.6} + 0.1255 \times \frac{15.9}{31.7} \right.$$

$$\left. + 0.0586 \times \frac{15.9}{35.3} + 0.0136 \times \frac{15.9}{39} \right) = 87.2\%$$

由以上结果可知，若得到的回波信号频谱宽度盲数  $W \geq 15.9$ ，则粗分类认为是直升机目标，若  $W \leq 15.9\rho$ ，则粗分类认为是固定翼飞机目标，否则留待细分类算法判决。

取  $N = 4$ ， $\lambda = 0.2\text{m}$ ， $R = 40\text{km}$ ， $v = 250\text{km/h}$ ， $W_1 = 15.9$ ， $\rho = 0.1$ ，采样率为4kHz。转速，叶片长度和入射角通过高斯随机过程产生，来近似模拟其不确定性。旋翼转速  $f_{rot}$  一般在4~6Hz之间，取  $f_{rot} \sim N(5, 1^2)$ ；叶片长度一般为  $7 \pm 10\%$ m，取  $l \sim N(7, 0.7^2)$ ； $r$  一般为0.2~0.3m， $r$  对谱宽影响较小，为简化计算可取  $r = 0.25\text{m}$ ；假设入射角在  $\pi/12$  附近取值，可取  $\alpha \sim N(\pi/12, \pi^2/144)$ 。由于固定翼飞机频谱调制难以定量建模分析，故采用某次外场试验对运-5飞机的实测数据。运-5飞机目标飞行高度约为300m，目标径向距离为3~6km，雷达置于高约80m建筑物顶，通过动目标显示(MTI)记录目标运动轨迹，获得FFT多普勒频谱数据。设定信噪比SNR，给直升机仿真数据加高斯白噪声，表5和表6给出了两种信噪比下，本文算法对空中两类目标的粗分类的统计结果。

表 5 对空中目标的粗分类 (SNR = 10dB)

Table 5 Rough Classification of air-targets (SNR=10dB)

目标 \ 分类	直升机	固定翼机	拒判
直升机	76%	0	24%
固定翼机	0	95%	5%

表6 对空中目标的粗分类 (SNR = 20dB)

Table 6 Rough Classification of air-targets(SNR=20dB)

目标 \ 分类	直升机	固定翼机	拒判
直升机	83%	0	17%
固定翼机	0	97%	3%

### 4 结束语

目标识别关键在于提取简单、稳定、互不相关和特征空间维数尽量小的特征量。而采用多普勒雷达识别武装直升机的关键在于提取旋翼回波的特征信息。由于直升机旋翼回波信号与直升机的转速、叶片长度和雷达照射角有关，在实战中这些因素都是不确定的，而且直升机机动灵活，适合于作各种战术动作，雷达检测时间短，这都使得机载雷达探测到的旋翼回波信息变得不确定。实施有效地处理包含在时域波形和频谱特征的不确定性信息是识别武装直升机的关键。

文献[6]对一般性的周期运动构件的雷达调制回波特性提取方法进行论述，本文首次给出的直升机回波信号频谱宽度近似估算思路适应于一般的旋转体回波信号。文中首次尝试将未确知数学应用于目标识别，通过定义多普勒频谱宽度盲数，较全面考虑了空中目标识别中的不确定性，并举例说明本文算法。

### 参 考 文 献

- [1] Philippe Pouliguen, Lionel Lucas, Franck Muller, et al.. Calculation and analysis of electromagnetic scattering by helicopter rotating blades. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2002, 50(10): 1396 – 1408.
- [2] Harry E. Green. Electromagnetic backscattering from a helicopter rotor in the decametric wave band regime. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1994, 42(4): 501 – 509.
- [3] Wellman R J, Silvius J L. Doppler signature measurements of a Mi-24 Hind-D helicopter at 92 GHz. AD, ADA351581, 1998.
- [4] Martint J, Mulgrew B. Analysis of the effects of blade pitch on the radar return signal from rotating aircraft blades. Radar 92. International Conference, 1992: 446 – 449.
- [5] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 不确定性信息数学处理及应用. 北京: 科学出版社, 1999: 160 – 182.
- [6] 邹焕新, 杜攀, 胡卫东, 等. 周期性运动构件调制回波的特性研究. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(6): 58 – 61.

陈行勇：男，1978年生，博士生，研究方向为自动目标识别与模糊工程。

魏玺章：男，1976年生，副教授，研究方向为雷达信号处理。

黎湘：男，1967年生，教授，研究方向为非线性信号处理、雷达目标识别。

郭桂蓉：男，1937年生，中国工程院院士，研究方向为自动目标识别与模糊工程。