

文章编号: 1000-6893(2003)05-0452-04

悬停直升机回波信号检测和分类

李道京, 张麟兮, 俞卞章
(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

Detection and Classification of Hovering Helicopter Signal

LI Dao-jing, ZHANG Lin-xi, YU Bian-zhang
(Northwestern Polytechnical University, Xi an 710072, China)

摘要: 分析了直升机回波信号的特征, 根据其旋翼回波信号周期平稳的特点, 通过对长观察时间获得的直升机旋翼回波信号的相关处理, 提高对低信噪比闪烁脉冲串信号的检测能力以增大雷达对悬停直升机的检测距离。在此过程中, 根据闪烁脉冲出现的周期, 提出的基于互相关系数的检测器, 可同时完成对悬停直升机的分类。给出了仿真和实际直升机回波信号的分析处理结果。

关键词: 目标检测; 目标分类; 周期平稳; 相关处理; 直升机

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

Abstract: The characteristics of helicopter echoes are analyzed. According to the cyclostationary characteristics of helicopter rotor blade echoes, the correlation processing for long time blade echoes is used to increase the signal-noise rate of flash echoes for improving the detection range for hovering helicopters. At the same time, the cross-correlation coefficient based detector can provide the classification results for hovering helicopters by the period of flash echoes. The processing results of simulation and real data are presented.

Key words: target detection; target classification; cyclostationary; correlation processing; helicopter

武装直升机作战性能的不不断提高, 要求防空雷达系统进一步提高对其检测能力。当武装直升机工作于悬停状态时, 直升机机体信号通常会被雷达的 MTI 系统滤掉。检测悬停直升机可利用的信号就是可通过 MTI 系统的旋翼回波信号, 故悬停直升机的检测问题有其特殊性, 不仅涉及到低 RCS 目标检测问题, 而且涉及到旋翼回波的信号处理问题。这中间直升机旋翼信号特征对悬停直升机的检测和分类都具有重要的作用。

目前悬停直升机检测方法, 主要是基于对单次旋翼闪烁脉冲的检测^[1,2], 而其检测器的工作原理和传统的检测器相同。对目前大多数搜索雷达来讲, 天线一次扫过目标获得的观察时间通常在数十毫秒, 故利用一至两次旋翼闪烁脉冲信号来检测悬停直升机有一定的可行性。事实上直升机旋翼的 RCS 较大(在 S 波段, 旋翼的 RCS 10m^2)^[3], 但由于其产生的闪烁脉冲信号持续时间较短, 而出现周期又较长, 等效的 RCS 仍然很小(约 0.1m^2 左右^[3]), 故极大地限制了雷达对悬停直升机的检测距离。当雷达对悬停直升机的观察时间 T_s 可以较长(达到数百毫秒至秒级), 研究利用多个闪烁脉冲提高信噪比以增大雷达检测

距离的方法显然是有意义的, 此问题也属于雷达信号的长时间积累问题。直升机处于悬停状态不会涉及目标的距离门跨越问题, 这似乎使信号的长时间积累问题变得简单, 但由于旋翼产生的回波脉冲不能连续获得, 仅“闪烁”出现, 又使常用的雷达信号长时间积累方法难以使用。

本文利用仿真和实际数据分析了直升机回波信号特征, 根据旋翼回波信号周期平稳的特点, 通过对长观察时间获得的旋翼回波信号的相关处理, 完成对悬停直升机的检测和分类。

1 直升机旋翼信号的相关处理

直升机旋翼视频回波信号为^[4]

$$S_B(t) = A \prod_{n=0}^{N-1} \text{sinc} \left[kL \sin \left(2 f_{\text{rot}} t + \frac{2}{N} n + \right) \right] e^{-jkL \sin \left(2 f_{\text{rot}} t + \frac{2}{N} n + \right)} \quad (1)$$

其中: A 为旋翼信号幅度; f_{rot} 为旋翼旋转频率; N 为旋翼桨叶数目; L 为旋翼桨叶长度; ϕ 为雷达波长; θ 为旋翼信号初相; $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$, $k = 2\pi/\lambda$ 。

噪声环境下直升机旋翼视频回波信号为

$$S(t) = S_B(t) + n(t) \quad (2)$$

其中: $n(t)$ 可设为零均值方差为 σ^2 的高斯白噪声。

理论和实践都证明,不管是金属的还是复合材料的旋翼桨叶,当用电磁波照射时,根据旋转镜照射原理,雷达接收机可检测到一连串的脉冲回波信号,这种脉冲回波通常被称为旋翼闪烁脉冲,闪烁脉冲信号形状是由时间轴上 sinc 函数给定的^[1,2]。当 N 为偶数时,闪烁脉冲信号的周期 $T_P = 1/(Nf_{rot})$; 当 N 为奇数时, $T_P = 1/(2Nf_{rot})$ 。旋翼回波信号的这种特征,为其匹配检测^[5]和分类^[3,6]提供了有利的条件。

由于旋翼产生的闪烁脉冲信号具有周期性,根据文献[7],悬停直升机回波信号可看作周期平稳(或循环平稳)信号,其相关函数和协方差函数具有周期性。考虑到在低信噪比情况下对旋翼回波信号的检测和利用闪烁脉冲周期对不同桨叶数直升机的分类^[3]问题,本文对此决定采用基于相关的信号处理方案。

合理地选择雷达脉冲重复频率,以保证对直升机旋翼闪烁脉冲可采样两次,并在不产生采样损失的前提下,尽可能增大雷达的不模糊作用距离^[1]。当 MTI 系统用常用的两脉冲对消器形成,旋翼信号除很小的一部分低频信号被滤除外,绝大部分信号可通过 MTI 系统,故旋翼信号经过 MTI 处理后的波形变化不大。设雷达 MTI 系统输出的悬停直升机回波信号为 $S(t)$, 此时相关处理中用作参考的直升机旋翼回波信号可设为

$$H(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{sinc} \left[kL \sin \left(2 f_{rot} t + \frac{2}{N} n \right) \right] e^{-jkL \sin \left(2 f_{rot} t + \frac{2}{N} n \right)} \quad (3)$$

构造 $S(t)$ 与 $H(t)$ 的互相关系数为

$$\rho(\tau) = \frac{\text{Cov}_{SH}(\tau)}{\sqrt{\text{Cov}_S(0) \text{Cov}_H(0)}} \quad (4)$$

其中: τ 为延迟时间; $\text{Cov}_{SH}(\tau)$ 为 $S(t)$ 与 $H(t)$ 的互协方差函数; $\text{Cov}_S(0)$ 和 $\text{Cov}_H(0)$ 分别为 $S(t)$ 与 $H(t)$ 的方差。

根据已知, $\rho(\tau)$ 以 T_P 为周期,通常 $\rho(\tau)$ 的取值区间为 $[-T_P/2, T_P/2]$, 又设在该区间 $\rho(\tau)$ 的最大值为 ρ_m 。容易想到,当回波信噪比较大且参考信号 $H(t)$ 的参数和实际悬停直升机旋翼信号参数完全匹配时,在 $\tau \in [-T_P/2, T_P/2]$ 区间, ρ_m 的值较大,故用 $\rho(\tau)$ 有可能完成对悬停直升机的检测和分类。

不同种类的直升机,有不同的参数 L , N 和 f_{rot} , 其旋翼闪烁脉冲出现的周期也不同,由此可构造出不同的参考信号 $H_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, M$),

这里 M 为参考信号 $H_i(t)$ 的个数。对 $S(t)$ 计算出不同的 ρ_{im} , 并求其最大值 ρ_m 。设置门限 τ , 若 $\rho_m > \tau$, 则可判定检测到悬停直升机, 而其类型为与 ρ_m 对应的 $H_i(t)$ 所代表的种类, 这就是本文基于相关处理完成悬停直升机检测和分类的基本过程。

2 仿真数据的处理结果

在 L 波段雷达上进行仿真以验证上述思想。仿真中的雷达参数为: 雷达波长 $\lambda = 0.3\text{m}$, 雷达脉冲重复频率 $\text{PRF} = 3.5\text{kHz}$, 直升机旋翼旋转频率 $f_{rot} = 5\text{Hz}$, 旋翼桨叶数目 $N = 4$, 旋翼桨叶长度 $L = 7\text{m}$, MTI 处理由两脉冲对消器完成, 并设雷达对目标的观察时间 $T_S = 500\text{ms}$ 。PRF 的选择满足对旋翼闪烁脉冲信号的采样要求^[1]。仿真表明:

- (1) $\rho(\tau)$ 对参考信号 $H(t)$ 中参数 N 较敏感, N 与真实值不符时, ρ_m 会下降很多;
- (2) $\rho(\tau)$ 对参考信号 $H(t)$ 中参数 f_{rot} 较敏感, f_{rot} 与真实值相差 $\pm 1\%$, ρ_m 会下降很多;
- (3) $\rho(\tau)$ 对参考信号 $H(t)$ 中参数 L 不敏感, L 与真实值相差 $\pm 10\%$, ρ_m 无明显变化;
- (4) $H(t)$ 的参数和实际悬停直升机旋翼信号 $S(t)$ 参数完全匹配时, 信噪比越大, ρ_m 越大。

上述参数下的仿真同时表明, 当直升机旋翼产生的闪烁脉冲信噪比大于 0dB 时, 这种基于相关处理的方法对悬停直升机的检测概率 P_d 0.8 , 虚警率 $P_f \approx 10^{-4}$ (仿真中对应的门限 $\tau = 0.1$), 并可同时对其给出正确的分类。

由于参数 L 对 $\rho(\tau)$ 的影响较小, 故参考信号 $H_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 可简化为主要由 N 和 f_{rot} 两个参数决定, 以减少参考信号 $H_i(t)$ 的个数和信号处理量。文献[1,2]指出, 实际直升机参数 N 和 f_{rot} 的取值范围极其有限, 故在相关处理中需构造的参考信号 $H_i(t)$ 的个数 M 也是有限的。

图 1 给出了闪烁脉冲信噪比 $\text{SNR} = 0\text{dB}$ 时, 四桨叶悬停直升机回波信号 $S(t)$ 的幅值 ($T_S = 500\text{ms}$), 图 2 给出了 $H(t)$ 参数和图 1 信号 $S(t)$ 参数完全匹配时, 互相关系数 $\rho(\tau)$ 的变化情况 ($T_P = 50\text{ms}$), 由此可见这种基于相关处理方法的有效性。

式(3)决定的 $H(t)$ 毕竟是一个近似模型的理论结果, 尽管实际使用中可根据对真实悬停直升机回波信号的分析结果对其进行修正, 但在客

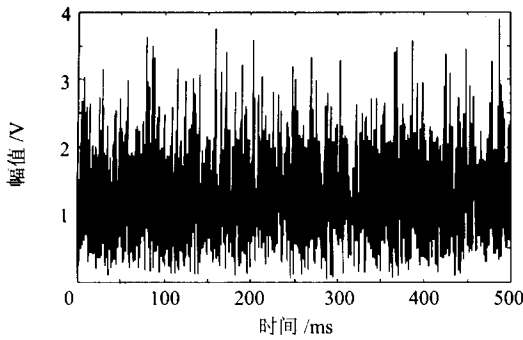


图1 0dB 信噪比仿真回波 $S(t)$ 的幅值

Fig. 1 Amplitude of stimulated signal (SNR = 0dB)

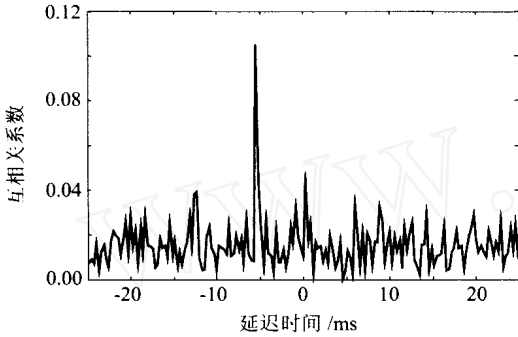


图2 $H(t)$ 和 $S(t)$ 匹配时 ρ 的变化曲线

Fig. 2 Curve of ρ when $S(t)$ and $H(t)$ are well matched

观上实现上面所讲的 $H(t)$ 参数和信号 $S(t)$ 参数完全匹配是困难的。在实际工作中,减少匹配所需的因素以使该方法可实用是重要的。

构造 $|S(t)|$ 与 $|H(t)|$ 的互相关系数 $\rho_A(\tau)$ 并用其完成对悬停直升机的检测和分类,可避免对 $S(t)$ 与 $H(t)$ 的相位匹配要求。上述参数下的仿真表明,此时要达到对悬停直升机的检测和分类要求 ($P_d = 0.8, P_f = 10^{-4}$),直升机旋翼产生的闪烁脉冲信噪比应大于 3dB(仿真中对应的门限 $\rho_{AT} = 0.12$)。

考虑到非线性变换的特点,进一步可构造 $|S(t)|^K$ 与 $|H(t)|^K$ (K 为大于等于 2 的整数)的互相关系数,由此可降低对 $|S(t)|$ 与 $|H(t)|$ 的包络匹配要求。当闪烁脉冲信噪比和 K 值都较大时, $|S(t)|^K$ 的包络接近矩形, $H(t)$ 的形式也可相应简化。

3 实际直升机回波信号的采集和分析

这里给出对真实的米 17 直升机回波信号的分析结果。米 17 直升机的桨叶数 $N = 5$, 桨叶长度 $L = 10\text{m}$ 。信号采集试验所用雷达为 X 波段 CS-8 连续波多卜勒测速雷达,其波长 $\lambda = 0.03\text{m}$,接收机通频带范围为 $60\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ (宽带高通滤波等效完成 MTI 处理),输出的零中频多

卜勒信号用数字存储示波器 LC334AL 记录下来,采样率为 200kHz 。试验中在距离直升机 500m 处采集到的一组悬停和低速运动直升机回波信号如图 3 和图 4 所示。

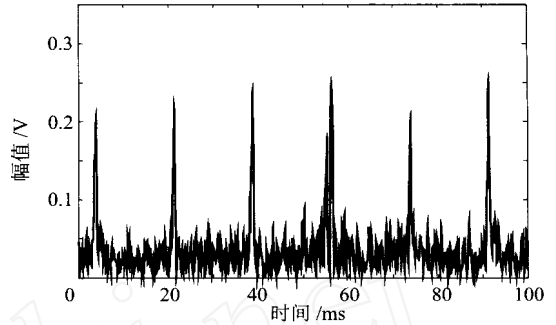


图3 悬停直升机回波信号的幅值

Fig. 3 Amplitude of hovering helicopter signal

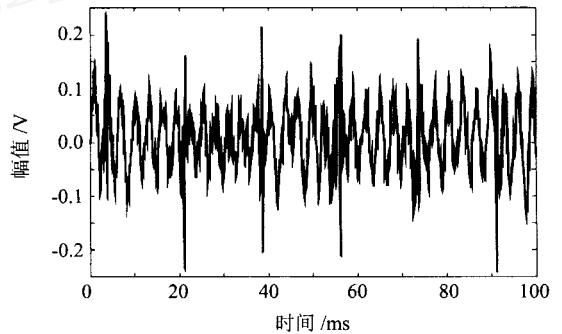


图4 低速运动直升机回波信号虚部波形

Fig. 4 Image-part waveform of moving helicopter signal

从大量采集到的试验数据看,直升机旋翼回波信号时域特征明显,与理论分析和仿真结果基本相符。由于试验中雷达和直升机的距离较近,测试距离不满足远场测量条件,试验采集到的闪烁脉冲信号的持续时间略有展宽。

直升机旋翼信号的谱较宽,传统的基于 FFT 的频域分析方法不能有效提取直升机回波信号特征,进一步的回波信号特征分析可利用时频分布进行^[8]。

4 实际直升机回波信号的处理结果

图 5 为米 17 直升机在悬停状态下,较长时间回波信号 $S(t)$ 的取幅结果 ($T_S = 500\text{ms}$)。对该信号 $S(t)$ 重采样,使其等效采样率为 35kHz ,然后和参考信号 $H(t)$ 进行相关处理,在 $H(t)$ 的参数为: $r = 0.03\text{m}, N = 5, L = 10\text{m}, f_{rot} = 5.7\text{Hz}$ 情况下, ρ_{im} 有最大值 ρ_{M0} 。

图 6 给出了 $S(t)$ 与 $H(t)$ 互相关系数 ρ 的变化情况 ($T_P = 17.5\text{ms}$)。图 7 给出了 $|S(t)|$

与 $|H(t)|$ 互相关系数 $A(\tau)$ 的变化情况 ($T_P = 17.5\text{ms}$)。和图 6 相比,图 7 中的 M 增大了许多。

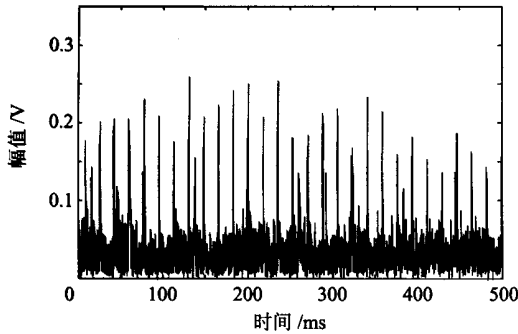


图 5 500ms 悬停直升机回波信号幅值

Fig. 5 Amplitude of 500ms signal for hovering helicopters

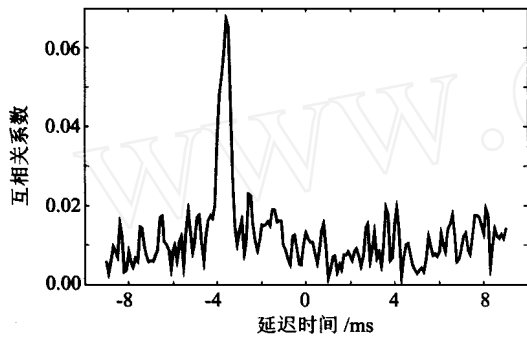


图 6 $S(t)$ 与 $H(t)$ 的互相关系数 $A(\tau)$

Fig. 6 Cross-correlation coefficient $A(\tau)$ of $S(t)$ and $H(t)$

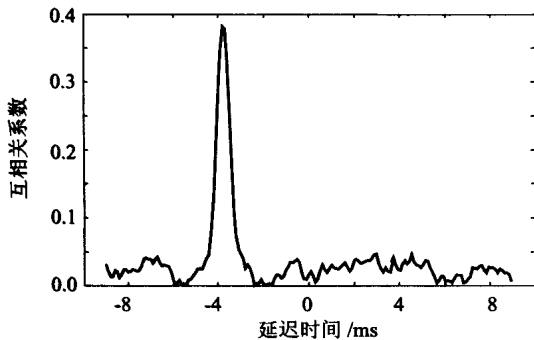


图 7 $|S(t)|$ 与 $|H(t)|$ 的互相关系数 $A(\tau)$

Fig. 7 Cross-correlation coefficient $A(\tau)$ of $|S(t)|$ and $|H(t)|$

值得指出的是,调整 L 值,使参考信号 $H(t)$ 产生的闪烁脉冲包络加宽以与真实直升机闪烁脉冲信号的持续时间相匹配,可使 $|S(t)|$ 与 $|H(t)|$ 互相关系数 $A(\tau)$ 的最大值 $M = 0.66$ 。而 $A(\tau)$ 的最大值小于 $A(\tau)$ 的最大值,也说明参考信号 $H(t)$ 和真实直升机回波信号 $S(t)$ 存在失配问题。此时,构造 $|S(t)|$ 与 $|H(t)|$ 的互相关系数 $A(\tau)$ 并用其完成对悬停直升机的检测显然可减少失配的影响。较大的 M 值虽对本文讨论的直升机分类作用不大,但反映了 $S(t)$ 与 $H(t)$ 的匹配程度好,有助于进一步的直升机识别工作。

仿真和实际直升机回波信号的分析处理结果,表明本文处理方法具有一定的可行性。

参 考 文 献

- [1] 李道京. 悬停直升机探测问题的研究[J]. 雷达与对抗, 1997(3): 1 - 5.
(Li D J. Research on detection of hovering helicopter [J]. Radar & ECM, 1997(3): 1 - 5.)
- [2] Wirth W D. Omnidirectional low probability of intercept radar [A]. Proceedings of the international conference on radar [C]. Paris: 1989. 25 - 30.
- [3] Wirth W D. Radar techniques using array antennas[M]. Scitech Publison Inc, 2001. 432 - 439.
- [4] Schmeider H. On the maximum entropy method for Doppler spectral analysis of radar echoes from rotating objects [A]. Proceeding of IEEE international radar conference [C]. 1987. 279 - 282.
- [5] 张军,赵洪钟,付强. 悬停直升机的匹配检测[J]. 现代雷达, 2002, 24(1) 33 - 36.
(Zhang J, Zhao H Z, Fu Q. Matching detecion of hovering helicopter [J]. Modern Radar, 2002, 24(1): 33 - 36.)
- [6] Rotander C E, von Sydow H. Classification of helicopters by the L/N-quotient [A]. Proceeding of IEEE Radar [C]. 1997. 629 - 633.
- [7] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998. 324 - 328.
(Zhang X D, Bao Z. Non-stationary signal analysis and processing [M]. Beijing: National defense industry press. 1998. 324 - 328.)
- [8] 郝莹,李道京,吕杨等. 直升机信号的采集和分析[J]. 雷达与对抗, 1999(2): 33 - 36.
(Xi Y, Li D J, Lu Y, et al. Acquisition and analysis of helicopter signal [J]. Radar & ECM, 1999(2): 33 - 36.)

作者简介:



李道京(1964 -) 男,陕西,高级工程师,西北工业大学博士生,现就职于西安电子工程研究所,主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理。



张麟云(1964 -) 男,四川,副教授,西北工业大学博士生,现就职于西北工业大学国防科技研究院,主要研究方向为微波通信。

俞卞章(1937 -) 男,上海,西北工业大学电子工程系教授,博士生导师,主要研究方向为信号处理。

(责任编辑:俞 敏)