

基于频域阻隔及 Wigner-Hough 变换的 反辐射导弹检测技术*

于媛, 王星

(空军工程大学工程学院, 西安 710038)

摘要:提出一种基于频域阻隔及 Wigner-Hough 变换(WHT)来检测 ARM 的新方法。利用雷达回波的频域(Fourier 变换)数据,根据尖峰作阻隔处理;运用 WHT 抑制强干扰和进行线性调频(LFM)信号检测与参数估计。仿真结果表明该方法能够在低信噪比背景中将导弹信号准确的检测出来,实现 ARM 发射的早期告警。

关键词:反辐射导弹;频域阻隔;Wigner-Hough 变换;线性调频信号

中图分类号:TJ761.9;TN957 **文献标志码:**A

ARM Detection Based on Frequency Domain Masking and Wigner-Hough Transform

YU Yuan, WANG Xing

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A new method based on frequency domain masking and Wigner-Hough transform is presented for anti-radiation missile (ARM) detection. The method adopts the frequency domain masking technique to mask the peak fields of the radar echos' Fourier transform data. Detecting and estimating the parameter of linear frequency modulate signal based on WHT. Computer simulation shows that an accurate detection of ARM signal can be achieved in the low SNR environment, which implies a reliable early warning of ARM launching.

Keywords: anti-radiation-missile; frequency domain masking; Wigner-Hough transform; linear frequency modulate signal

0 引言

飞机刚发射反辐射导弹(ARM)时,雷达的目标回波中存在载机分量和导弹分量,通常载机的目标反射面积大,而导弹的目标反射面积较小,回波功率要比载机的低近 20dB。一般载机在发射导弹时保持匀速,其回波在频域近似为单频信号,导弹在发射初期作匀加速运动,其回波表现为线性调频信号(LFM),因此要检测到 ARM 回波信号,本质上是在强杂波和噪声背景下的极弱信号的检测问题。于是 ARM 的检测识别技术主要是依靠 ARM 的飞行及电磁散射特点,提取特征量。从信号频域、时域和空域等方面入手,找出特征,予以区分,实现告警。国内的主要观点有回波特征识别、数字脉压技术^[1]、分数阶傅里叶变换^[2]、相位补偿法^[3]和神经网络

识别^[4]等。近年来,Wigner-Hough 变换作为一种新的时频分析工具,用来检测低信噪比条件下加性白噪声中的多分量线性调频信号,该方法已经在雷达、通信等诸多领域得到应用。文中控制带阻滤波器的中心频率,在频域将强载机分量去掉;再对剩下信号进行 WHT,然后与检测门限进行比较就可判断有无导弹信号,理论上可以实现 ARM 的实时告警。

1 回波信号模型与频域阻隔

1.1 载机和 ARM 回波信号模型

设 ARM 发射初期载机相对雷达的径向速度为 v ,ARM 相对雷达的加速度为 a ,则其速度为 $v + at$ 。因此在 ARM 发射初期,雷达回波信号为两者的合成,其复包络可表示为:

$$r(t) = r_1(t) + r_2(t) + n(t) =$$

* 收稿日期:2008-07-02

作者简介:于媛(1980-),河南巩义人,讲师,硕士研究生,研究方向:电子对抗理论与技术。

$$A_1 \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_1)] + A_2 \exp\{j[2\pi(f_0 t + \frac{1}{2}\mu_0 t^2) + \varphi_2]\} + n(t) \quad (1)$$

式中： $r_1(t) = A_1 \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_1)]$ 为回波中载机分量； A_1, φ_1 为载机信号的振幅和相位； $f_0 = 2v/\lambda$ 为载机多普勒频率； λ 为雷达工作波长。

$$r_2(t) = A_2 \exp\{j[2\pi(f_0 t + \frac{1}{2}\mu_0 t^2) + \varphi_2]\} \quad (2)$$

式(2)为回波中 ARM 分量；其中 A_2, φ_2 为 ARM 信号的振幅和相位； $\mu_0 = 2a/\lambda$ 为 ARM 信号的调频斜率； $n(t)$ 为高斯白噪声。

一般检测载机所要求信噪比 15dB 左右，而载机回波功率要比导弹的高出 20dB 至 27dB，通过直接对雷达回波作 FFT 变换的信号检测结果仿真图(见图 3)可以看出，当采样点有限时，由于 ARM 与载机分离的较短时间内，两者的速度相差较小，多普勒频率较接近，且 ARM 的幅度值较小，再加上噪声的影响，ARM 的傅里叶谱完全淹没在载机谱的副瓣之中，ARM 的信号很难检测出来。随着取样次数增多，虽可提高取样信号的质量，增加分辨率，但是多普勒滤波器的带宽减小，运算处理时间增多。作为雷达的一种附加工作方式，反辐射导弹的检测是不容许占用太多的时间资源。因此，抑制载机分量对检测 ARM 信号显得至关重要。

1.2 利用滤波器抑制载机分量

通常，雷达对目标的检测是直接对接收的采样数据进行 Fourier 变换，在不考虑噪声情况下，即为：

$$R(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} r(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [r_1(t) + r_2(t)] e^{-j\omega t} dt = R_1(\omega) + R_2(\omega) \quad (3)$$

$$R_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} r_1(t) e^{-j\omega t} dt = A_1 \sqrt{2\pi} \delta(\omega - \omega_0) \quad (4)$$

$$R_2(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} r_2(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{A_2}{\sqrt{2\mu_0}} e^{-j[(\omega - \omega_0)^2 / \mu_0 - \pi/4]} \quad (5)$$

式中 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为多普勒角频率。

由式(3) ~ 式(5)可知，当 ARM 的调频率为一定值时(即加速度一定)，它的傅里叶谱为模值一定的频域线性调频信号，而载机的傅里叶谱则为一位于其多普勒角频率处的冲

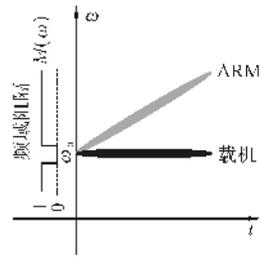


图 1 频域阻隔示意

击信号。雷达回波的 Fourier 变换为一冲击与一线性调频信号的叠加。如果在冲击所在的位置设置一极窄窗口，以阻隔掉载机分量，而其它保持不变，这样，就能得到单一的保持了绝大部分能量的 ARM 回波 Fourier 分量。阻隔处理^[5]如图 1 所示。

$$\text{令: } M(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega = \omega_0 \\ 1, & \omega \neq \omega_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{则 } R_M(\omega) = R(\omega) \cdot M(\omega) \approx R_2(\omega) \quad (7)$$

也就是说经过理想阻隔处理后的信号仅为 ARM 回波的 Fourier 变换。

2 Wigner-Hough 变换及 ARM 信号检测

2.1 Wigner-Hough 变换(WHT)的定义

时频分析中，魏格纳-维尔分布(WVD)是一种常用的方法。多分量信号采用 WVD 会出现交叉项，这对于信号检测影响很大，尤其在信噪比低的时候更加严重，采用平滑技术，时频聚集性会有所下降。于是将 WVD 与霍夫变换(HT)结合提出 WHT 法^[6]来检测信噪比较低的导弹信号。

给定信号 $r(t)$ ，其 WHT 为时域到 (f, μ) 参数域的映射，其公式如下：

$$WH_r(f, \mu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r(t + \frac{\tau}{2}) r^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi(f+\mu)\tau} d\tau dt \quad (8)$$

离散的 Wigner-Hough 变换定义如下：

$$WH_r(f, \mu) = \sum_t \sum_k r(t+k) r^*(t-k) e^{-j4\pi k(f+\mu)} \quad (9)$$

Wigner-Hough 变换另一种形式为：

$$WH_r(f, \mu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_r(t, v) \delta(v - f - \mu) dv dt$$

$$\mu t) dt dv = \int_{-\infty}^{\infty} W_r(t, f + \mu t) dt \quad (10)$$

上式表明,对于一个线性调频信号 $r_2(t)$ (见式(2)) 初始频率为 f_0 、调频斜率为 μ_0 的 WHT,其最大值出现在参数域 (f, μ) 中的坐标点 (f_0, μ_0) 处形成尖峰。偏离坐标点 (f_0, μ_0) 时,积分值迅速减小。则无噪离散线性调频信号 $r_2(t)$ 最大峰值为: $WHT(f_0, \mu_0) = \frac{N^2 A_2^2}{2}$; 但通常情况下,检测信号 $r(t)$ 中含有噪声,会在尖峰处随机起伏,故需要分析一下 $r_2(t) + n(t)$ (有噪 LFM 信号) 的检测性能。

2.2 Wigner-Hough 变换下的有噪 LFM 信号检测

期望值^[7]: $E\{WHT_{r+n}(f_0 + \mu_0)\} =$

$$\sum_t \sum_k E\{[r_2(t+k) + n(t+k)][r_2^*(t-k) + n^*(t-k)]\} \cdot e^{-j4\pi k(f_0 + \mu_0 t)}$$

令噪声的自相关函数为: $\delta_i^2 \delta_k$; 故, $E\{WHT_{r+n}(f_0, \mu_0)\} = \frac{N^2 A_2^2}{2} +$

$N\delta_i^2$ 。输出的方差与信号参数独立, 则

$$E\{|WHT_{r+n}(f_0, \mu_0)|^2\} = \frac{N^4 A_2^4}{4} + \frac{3N^3 A_2^2 \delta_i^2}{2} +$$

$\frac{3N^2 \delta_i^4}{2}$ 。综合上两式可得方差: $\text{var}\{WHT_{r+n}(f_0,$

$\mu_0)\} = \frac{N^3 A_2^2 \delta_i^2}{2} + \frac{N^2 \delta_i^4}{2}$ 。定义 WHT 的输出信噪

比^[8]为: $SNR_{\text{OUT}} = \frac{|WHT_r(f_0, \mu_0)|^2}{\text{var}\{WHT_{r+n}(f_0, \mu_0)\}}$, 故:

$$SNR_{\text{OUT}} = \frac{N^4 A_2^4}{2(N^3 A_2^2 \delta_i^2 + N^2 \delta_i^4)} = \frac{N^2 SNR_{\text{IN}}^2}{2(N \cdot SNR_{\text{IN}} + 1)} \quad (11)$$

式中 $SNR_{\text{IN}} = A_2^2 / \delta_i^2$ 。

分析式(11)可得:当输入信噪比 $SNR_{\text{IN}} \gg 1$ 时, $SNR_{\text{OUT}} \approx N \cdot SNR_{\text{IN}} / 2$; 反之 $SNR_{\text{IN}} \ll 1$ 时, $SNR_{\text{OUT}} \approx N^2 \cdot SNR_{\text{IN}}^2 / 2$, 这时输出信噪比比输入信噪比还要低。这两种极端情况说明, WHT 既可以改善信噪比, 也可能恶化信噪比。因此, 门限处应满足 $N \cdot SNR_{\text{IN}} = 1$, 即 WHT 对信噪比有改善所需要的最低输入信噪比为 $SNR_{\text{IN}} = 1/N$ 。对于雷达信号检测来说, 要求信号 $SNR_{\text{OUT}} \geq 15\text{dB}$, 所以, $SNR_{\text{IN}} = -5\text{dB}$ 时, 采样点数 $N > 200$ 。故采样点数 N 影响信噪比, 增加长度可以改善信噪比(见图 3), 但根据实际情况又不能任意

增大。

3 仿真分析

3.1 仿真参数

在实际检测中, 先对接收信号采样, 得 $r(n) = r(nT)$, $n = 1, 2, \dots, N$, T 为雷达脉冲重复频率, 然后作 N 点 FFT, 根据有无超过门限的峰值决定有无载机, 这是一般情况下的雷达目标检测。如果有, 则存在载机, 这时根据峰值点位置, 在一定范围内进行阻隔, 即将 N 点 FFT 数据峰值位置一定带宽内的数据置 0, 其它数据不变; 然后对剩下信号作 N 点 IFFT, 再进行 WHT 变换与检测门限进行比较, 做出判断。

整个导弹检测的系统框图如图 2 所示。

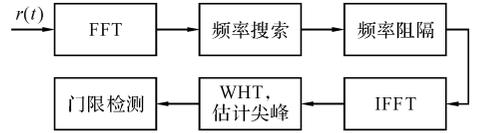


图 2 系统框图

仿真参数: 雷达工作波长 $\lambda = 0.22\text{m}$; 飞机发射 ARM 时的飞行速度 $v = 450\text{m/s}$, 对应 $f_0 = 2v/\lambda = 4.09\text{kHz}$; 加速度 $a = 200\text{m/s}^2$, 对应的调频率 $\mu_0 = 2a/\lambda = 1.8\text{kHz/s}$; 高斯白噪声 $\sigma = 0.2$; 载机信噪比 15dB ; ARM 信噪比 -5dB ; 抽样频率要满足两个定理, 一是抽样频率要大于两倍的检测频率, 二是两倍的抽样间隔要大于两频率的差值(奈奎斯特抽样定理), 故选抽样频率为 $1.0 \times 10^4\text{Hz}$; 根据实际 FFT 和 IFFT 点数均选取 512 (此时 ARM 和载机在同一距离门内); 频域阻隔带宽取为 48 点。

3.2 仿真结果与分析

图 3 是当回波信号存在载机分量时, FFT 数据未经阻隔处理, 导弹信号难以检测出来, 仍淹没在强载机信号里; 增大 N 值, ARM 信号出现, 但十分微弱。图 4 是有导弹发射时抑制掉载机干扰后, 仅剩 ARM 信号和噪声信号作 WHT 的结果, 此时时频面上仅出现一个强的尖峰信号, 说明检测出了导弹。图 5 是无导弹发射时抑制掉载机后的 WHT 变换。设置合理检测门限, 无导弹时不出现虚警。

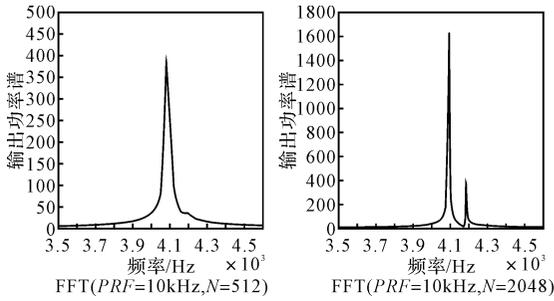


图 3 直接对雷达回波作 FFT 变换的信号检测结果

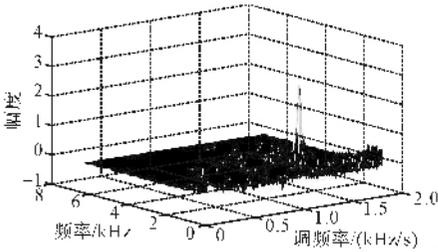


图 4 有导弹发射时检测结果

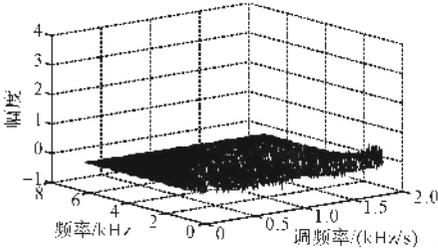


图 5 无导弹发射时检测结果

4 结 论

文中提出用频域阻隔和 WHT 变换来检测 ARM,充分利用了现有载机的 FFT 数据,实现强干扰下的弱 LFM 信号的检测分析方法。WHT 估计算法最主要的不足之处是计算十分耗

时;当多分量的信号存在强度大小不一的分量时,强信号会淹没弱信号。针对 WHT 检测具有门限效应的特点,可以探讨对信号预处理,提高 SNR_{IN} 的方法来改善性能。仿真结果表明,本方法能够在强杂波和低信噪比背景中将 ARM 信号准确检测出来,实现实时告警。

参 考 文 献:

- [1] 殷浩. 机载相控阵雷达 ARM 检测工作方式研究[J]. 现代雷达, 1999, 2(1): 1—8.
- [2] 齐林,陶然. 基于分数 Fourier 变换的多分量 LFM 信号的检测和参数估计[J]. 中国科学 E 辑, 2003, 33(8): 749 - 759.
- [3] 陈建春,耿富录,徐少莹. 基于自适应线性预测滤波的反辐射导弹检测技术[J]. 电子学报, 2001, 29(6): 755—757.
- [4] 文树梁,秦忠宇. 一种基于神经网络的识别反辐射导弹法[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(9): 12—19.
- [5] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[J]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 186—223.
- [6] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform[J]. IEEE Trans. on SP, 1995, 43: 1511—1515.
- [7] 孙晓昶,皇甫堪. 基于 Wigner-Hough 变换的多分量 LFM 信号检测及离散计算方法[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 241—244.
- [8] 戴征坚,郁文贤,胡卫东,等. 强干扰下 LFM 信号的检测与参数估计[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(3): 50—54.

(上接第 254 页)

研究的基础上,对基于角速度和角位置两种补偿方式进行了研究,仿真结果表明,载体姿态变化对天线指向的影响较大,须进行补偿,否则将引起波束指向偏离卫星,造成通信的中断或失败,两种补偿方式均能在一定程度上实现载体姿态变化的隔离,其中角速度补偿工作在速度环,具有较快的响应速度,但其实质是开环补偿,须有跟踪辅助或者角位置补偿保障精度;角位置补偿工作在位置环,具有较高的响应精度,但响应速度慢,须工作在稳定环或速度环保障速度的基础上。

参 考 文 献:

- [1] 王惠林,纪明. 一种新颖的瞄准线高精度稳定补偿方法研究[J]. 应用光学, 2001, 22(5): 40—42.
- [2] 饶思成,龙锐. 行进间跟踪轴线稳定技术[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(4): 464—468.
- [3] 李志勇,武玮. 瞄准线稳定和跟踪系统[J]. 电光与控制, 1999(4): 28—32.
- [4] Russell T Rudin. Strapdown stabilization for imaging seekers[R]. AIAA-93-2660, 1993.
- [5] Kennedy Peter J. Direct versus indirect line of sight(LOS) stabilization[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2003, 11(1): 3—15.
- [6] 周瑞青. 弹载捷联式天线平台的稳定技术研究及其角跟踪系统设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.