

# 基于 Wigner-Hough 变换的 LFM 信号检测性能分析

刘建成<sup>1</sup>, 王雪松<sup>1</sup>, 刘 忠<sup>1</sup>, 肖顺平<sup>1</sup>, 王国玉<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 河南洛阳 061 信箱, 河南洛阳 471003)

**摘 要:** 根据 Wigner-Hough 变换思想和广义似然比检验理论, 分析了双门限情况下线性调频信号的检测性能, 给出了虚警概率和检测概率的数学表达式, 该表达式是 Hough 变换的积累单元数和检测门限的函数, 然后对概率密度函数进行了合理近似, 并给出了 Hough 变换的积累单元数计算公式, 最后的计算机仿真比较了傅立叶变换和 Wigner-Hough 变换的 LFM(Linear Frequency Modulated) 信号检测性能和基于 Wigner-Hough 变换的不同目标起伏类型的 LFM 信号检测性能。

**关键词:** 线性调频信号; 检测性能; Wigner-Hough 变换

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1212-06

## Detection Performance of Linear Frequency Modulated Signals Based on Wigner-Hough Transform

LIU Jian-cheng<sup>1</sup>, WANG Xue-song<sup>1</sup>, LIU Zhong<sup>1</sup>, XIAO Shun-ping<sup>1</sup>, WANG Guo-yu<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China; 2. Postbox 61, Luoyang, Henan 471003, China)

**Abstract:** Detection performance of linear frequency modulated signal is analyzed in theory according to Wigner-Hough transform and generalized likelihood ratio test (GLRT) theory when two detection thresholds are set, and expressions for the probability of false alarm (PF) and the probability of detection (PD), as a function of the number of accessible Hough space accumulator cells and detection threshold. Then probability density function is approximated rationally and the calculation of the number of accessible Hough space accumulator cells is derived. Finally comparison of detection performance of based on Fourier transform and based on Wigner-Hough transform is made, and comparison of detection performance of different Swerling fluctuating targets is made also.

**Key words:** linear frequency modulated signal; detection performance; Wigner-Hough transform

## 1 引言

脉冲多普勒雷达是当前主动雷达制导武器中的一种重要形式, 研究和分析多普勒雷达的检测性能很有必要. 当导弹与目标之间存在相对运动时, 多普勒效应表现为导引头接收到的目标回波信号与基准信号之间的频率差异, 其频差比例于导弹-目标径向速度. 当导弹攻击低空目标时, 无法从时域上检测“淹没”在地海杂波中的微弱信号. 利用多普勒效应, 可以在频域上区分地海杂波与目标信号. 因此, 数字傅立叶变换是脉冲多普勒雷达导引头信号处理的核心<sup>[1~3]</sup>. 多普勒雷达导引头是一种相参雷达导引头, 其物理基础是多普勒效应, 它发射相参脉冲串信号, 特别是高重复频率相参脉冲串信号, 并相干接收目标散射的回波信号. 在恒径向速度假

设下, 通过确定雷达信号序列的傅立叶功率谱和最大值所在位置实现相干积累. 如果最大值超过门限值则认为检测到目标, 且把最大值所在位置作为径向速度的估计.

在现代战争条件下, 防空导弹机动性能越来越高, 再入段弹头也有很高的速度和很大的加速度, 因此导弹-目标的径向加速度会很大, 恒径向速度假设不再成立. 在末制导段, 防空导弹上的雷达导引头探测再入段弹头时, 雷达目标回波信号中不仅含有径向速度引起的多普勒调制项, 而且径向加速度引起的二次相位项也会对回波信号产生时变调制. 而数字傅立叶变换的实质是对信号的一次相位项进行相干匹配处理, 如果仍采用基于数字傅立叶变换的方法处理线性调频信号, 输出信噪比必然会受损失, 导致检测性能下降.

收稿日期: 2005-11-07; 修回日期: 2007-01-13

基金项目: 全国优秀博士学位论文专项资金 (No. 08100101)

时频分析,特别是双线性时频能量分布 Cohen 类,在雷达信号处理方面得到很广泛的应用<sup>[4-6]</sup>.在所有双线性时频分布中,Wigner-Ville 分布具有理想的性质和很高的分辨力<sup>[7,8]</sup>,因而受到最多的重视.文献[9,10]提出 Wigner-Ville 分布和 Hough 变换结合用于线性调频信号的检测和估计.文献[11]分析了单门限情况下基于 Wigner-Hough 变换对非起伏目标的检测性能.为提高运算速度,在实际应用时多采用双门限,即在 Hough 变换前设初始门限,Hough 变换后设第二门限.双门限情况下基于 Wigner-Hough 变换对起伏目标的检测性能分析是本文的研究内容,也是对文献[11]的扩充.

本文首先叙述 Wigner-Hough 变换与广义似然比检验的关系,然后从理论上分析单门限和双门限情况下基于 Wigner-Hough 变换的线性调频信号的检测性能,分别推导虚警概率和检测概率的数学表达式,并给出 Hough 变换的积累单元数计算公式,最后仿真比较非起伏目标基于傅立叶变换和基于 Wigner-Hough 变换的检测性能,及不同起伏类型目标基于 Wigner-Hough 变换的检测性能.

## 2 Wigner-Hough 变换和广义似然比检验

考虑假设检验:

$$\begin{aligned} H_0: r(t) &= w(t) \\ H_1: r(t) &= bs(t; \underline{m}) + w(t), \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $w(t)$  为零均值高斯复白噪声,即:  $w(t) = w_R(t) + jw_I(t)$ ,  $w_R(t)$  和  $w_I(t)$  是相互独立的零均值高斯实白噪声,有相同的功率谱密度  $P_w(f) = \frac{N_0}{2}$ .  $s(t; \underline{m})$  为确定性复信号,除参数向量  $\underline{m}$  外均已知.  $b$  为常数.

对未知参数信号的检验一般采用广义似然比检验(GLRT).当数据量大时广义似然比检验是最优的. GLRT 定义如下:  $p(r(t); \underline{m} | H_1)$  为  $r(t)$  在  $H_1$  假设下的概率密度函数,  $p(r(t) | H_0)$  为  $r(t)$  在  $H_0$  假设下的概率密度函数,则如果满足

$$g(r) = \frac{\max_{\underline{m}} p(r(t); \underline{m} | H_1)}{p(r(t) | H_0)} \quad (2)$$

则判决  $H_1$  成立.

在  $H_1$  情况下对  $\underline{m}$  进行最大似然估计,得到最优判决策略,即当满足下式时  $H_1$  成立:

$$l = \max_{\underline{m}} \left| \int_{-T/2}^{T/2} r(t) s^*(t; \underline{m}) dt \right|^2 > \quad (3)$$

由 Moyal 公式得到<sup>[7]</sup>

$$\left| \int_{-T/2}^{T/2} r(t) s^*(t; \underline{m}) dt \right|^2 = \int \int W_r(t, \omega) W_s^*(t, \omega; \underline{m}) dtd\omega \quad (4)$$

式中,  $W_r(t, \omega)$  是  $r(t)$  的 Wigner-Ville 分布,  $W_s(t, \omega; \underline{m})$

是  $s(t; \underline{m})$  的 Wigner-Ville 分布.

代入式(3),即为

$$l = \max_{\underline{m}} \int \int W_r(t, \omega; \underline{m}) dtd\omega > \quad (5)$$

对如下的线性调频信号:

$$s(t, \underline{m}) = e^{j(\omega_0 t + \frac{1}{2} m t^2)} \quad (6)$$

式中,  $\underline{m} = (\omega_0, m)$  为未知参数. 如果观测时长  $T$ , 则其 Wigner-Ville 分布为

$$W_s(t, \omega; \underline{m}) = 2 \delta(\omega - \omega_0 - mt) \quad (7)$$

上式代入式(5),得到

$$l = \max_{\omega_0, m} \int W_r(t, \omega_0 + mt) dt > \quad (8)$$

则 GLRT 变为:满足式(8)时  $H_1$  成立.

式(8)可总结为:为最优检测在白高斯噪声环境中未知瞬时频率的线性调频信号,计算接收信号的 Wigner-Ville 分布,得到时频分布,并在时频面上沿线积分,然后最大积累值与门限比较,如果超过门限值则判决  $H_1$  成立. 而 Hough 变换是把一个二维信号沿线积累变换到另一个二维信号. 通过对线性调频信号进行 Wigner-Hough 变换,把信号从时域变换为由频率和调频率组成的参数空间域,然后在该参数空间域进行检测和估计. Hough 变换把检测和估计结合在一起. 当观测时长  $T$  时,上述检验是最优的. 在实际应用中,由于  $T$  为一常数,所以是渐进最优的.

在实际应用中,只能取有限长度的采样数据为

$r(n)$ ,  $n = \frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}$ , 其 Wigner-Ville 变换为<sup>[7]</sup>:

$$W_r \left( n - \frac{l}{L}, \frac{\omega}{L} \right) = 2 \sum_{k=-\frac{L}{2}-1}^{\frac{L}{2}-1} r(n+k) r^*(n-k) e^{-jkl} \quad (9)$$

式中,  $L$  为 Wigner-Ville 变换的频率单元数.

由于雷达接收信号为多个目标的回波信号或干扰信号的合成,而多分量信号的 Wigner-Ville 分布存在交叉项<sup>[10]</sup>. Wigner-Hough 变换在一定程度上抑制了交叉项的影响. 为进一步减少交叉项影响,可选择不同的核函数对 Wigner-Ville 分布在时频域进行平滑<sup>[4]</sup>.

雷达接收信号经 Wigner-Ville 变换后进行 Hough 变换. Hough 变换采用标准参数化方法:

$$t = r \cos \theta + f \sin \theta \quad (10)$$

式中,  $r$  为直线到原点距离,  $\theta$  为直线过原点垂线与  $x$  轴夹角,  $t$  和  $f$  为时频面上的点.

在实际应用中,  $r$  和  $\theta$  均要离散化,采样间隔分别为  $\Delta r$  和  $\Delta \theta$ .

## 3 检测性能理论分析

在检测问题中,虚警概率和检测概率是两个重要

的量. 首先给出虚警概率和检测概率随门限改变的函数.

在 Hough 面上,  $X_i$  为接收信号经 Wigner-Hough 变换后的 Hough 面  $(t, x)$  点的累积值. 若检测门限为  $\tau$ , 则其虚警概率为:

$$\begin{aligned} P_F(\tau) &= P(\exists(t, x), X_i = \sum_{n=1}^N C_n(t, x) > \tau | H_0) \\ &= 1 - P(\forall(t, x), X_i = \sum_{n=1}^N C_n(t, x) < \tau | H_0) \\ &= 1 - \int f_i(x | H_0) dx \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $\exists(t, x)$  表示存在  $(t, x)$ ,  $\forall(t, x)$  表示对任意  $(t, x)$ ,  $N$  为 Hough 变换在  $(t, x)$  点的累积点数, 下节将说明如何获得  $f_i(x | H_0)$  为噪声经 Wigner-Hough 变换后 Hough 面  $(t, x)$  点的累积值的概率密度函数. 在时频面上所有直线均近似为相互独立, 因为有些直线会经过同一些点. 然而这种近似是可以接受的, 因为两条直线最多有几个相同的点.

其检测概率为:

$$\begin{aligned} P_D(\tau) &= P(X_i = \sum_{n=1}^N C_n(t, x) > \tau | H_1) \\ &= \int f_i(x | H_1) dx \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $f_i(x | H_1)$  为接收信号经 Wigner-Hough 变换后在 Hough 面上  $(t, x)$  点的累积值的概率密度函数.

为减少运算时间, 在 Hough 变换前设定初始门限, 对时频单元做出判决. 当判决值大于该门限时则进行 Hough 变换, 否则忽略掉该点. 假设初始门限为  $\tau_0$ , 则每个时频单元的检测概率为:

$$P_d = P(C(t, x | H_1) > \tau_0) = \int f_{i_0}(x | H_1) dx \quad (13)$$

式中,  $f_{i_0}(x | H_1)$  为接收信号经 Wigner-Ville 变换后在时频面上  $(t, x)$  点的概率密度函数.

初始门限可由时频单元的虚警概率确定, 满足:

$$P_F = P(C(t, x | H_0) > \tau_0) = \int f_{i_0}(x | H_0) dx \quad (14)$$

式中,  $f_{i_0}(x | H_0)$  为噪声经 Wigner-Ville 变换后在时频面上  $(t, x)$  点的概率密度函数.

满足初始门限的点经 Hough 变换到参数空间. 假设第二门限为  $\tau$ , 则可确定最终的虚警概率和检测概率. 其虚警概率为:

$$\begin{aligned} P_F(\tau) &= P(\exists(t, x), X_i = \sum_{n=1}^N C_n(t, x) > \tau | H_0) \\ &= 1 - P(\forall(t, x), X_i = \sum_{n=1}^N C_n(t, x) < \tau | H_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &1 - P(X_i = \sum_{n=1}^N C_n(t, x) < \tau | H_0) \\ &= 1 - \int_{n=1}^N \left[ \prod_{n=1}^N p_d^n (1 - p_d)^{N-n} \right] f_i(x | H_0) dx \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $\exists(t, x)$  表示存在  $(t, x)$ ,  $\forall(t, x)$  表示对任意  $(t, x)$ ,  $N$  为 Hough 变换在  $(t, x)$  点的累积点数, 下节将说明如何获得  $f_i(x | H_0)$  为噪声经 Wigner-Hough 变换后 Hough 面  $(t, x)$  点的累积值的概率密度函数. 在时频面上所有直线均近似为相互独立, 因为有些直线会经过同一些点. 然而这种近似是可以接受的, 因为两条直线最多有几个相同的点.

其检测概率为:

$$\begin{aligned} P_D(\tau) &= P(X_i = \sum_{n=1}^N C_n(t, x) > \tau | H_1) \\ &= \int_{n=1}^N \left[ \prod_{n=1}^N p_d^n (1 - p_d)^{N-n} \right] f_i(x | H_1) dx \end{aligned} \quad (16)$$

式中,  $f_i(x | H_1)$  为接收信号经 Wigner-Hough 变换后在 Hough 面上  $(t, x)$  点的累积值的概率密度函数.

从式(15)和(16)看出, 为计算虚警概率和检测概率, 需要确定  $f_{i_0}(x | H_0)$ 、 $f_{i_0}(x | H_1)$ 、 $f_i(x | H_0)$  和  $f_i(x | H_1)$ .

在平稳谱估计领域, 服从  $\chi^2$  分布的随机变量加权分布的分布可由等价自由度的  $\chi^2$  分布来近似, 且

$$v = 2 \frac{\left( \sum_{i=1}^v \frac{1}{i} \right)^2}{\sum_{i=1}^v \frac{1}{i}} \quad (17)$$

任何一个时频分布均可以表示为谱图的加权和形式<sup>[12~14]</sup>, 即:

$$C(t, x) = \sum_i |S_i(t, x)|^2 \quad (18)$$

式中,  $\lambda_i$  为特征值,  $|S_i(t, x)|^2$  为由对应特征函数计算的谱图.

因此, 在  $H_0$  假设下, 对于高斯白噪声,  $|S_i(t, x)|^2$  服从  $\chi^2$  分布. 因此  $f_{i_0}(x | H_0)$  可由等价自由的  $\chi^2$  分布来近似. 同上,  $C_n(t, x)$  的分布, 即  $f_i(x | H_0)$  可由自由度为  $vN_{\text{cum}}$  的  $\chi^2$  分布来近似.

在  $H_1$  假设下, 对于混有高斯白噪声和目标回波的

雷达接收信号,其  $|S_i(t, \tau)|^2$  服从非中心  $\chi^2$  分布,其偏心参数为  $Lb^2$ . 因此  $f_{i, \tau}(x|H_1)$  可由非中心  $\chi^2$  分布来近似,其自由度为  $\nu$ , 偏心参数为  $Lb^2$ , 则  $C_n(t, \tau)$  的分布,即  $f_{i, \tau}(x|H_1)$  可由自由度为  $\nu N_{cum}$ , 偏心参数为  $Lb^2$  的  $\chi^2$  分布来近似.

#### 4 Hough 变换积累单元数

对离散化的  $f$  和  $t$ , Hough 变换是对平行四边形行的数据进行累加. 当  $0 < \frac{\Delta \rho}{\cos \theta} < \frac{1}{2}$  时,由图 1 所示,平行四边形的面积可表示为  $\frac{N}{\cos \theta}$  或  $\frac{N}{\cos \theta}$ . 当  $\frac{1}{2} < \frac{\Delta \rho}{\cos \theta} < 1$  时,平行四边形的面积可表示为  $\frac{N}{-\cos \theta}$  或  $\frac{N}{\cos \theta}$ . 当  $1 < \frac{\Delta \rho}{\cos \theta} < \frac{3}{2}$  时,平行四边形的面积可表示为  $\frac{N}{-\cos \theta}$  或  $\frac{N}{\cos \theta}$ . 当  $\frac{3}{2} < \frac{\Delta \rho}{\cos \theta} < 2$  时,平行四边形的面积可表示为  $\frac{N}{\cos \theta}$  或  $\frac{N}{\cos \theta}$ .

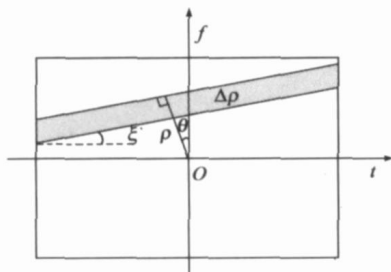


图 1 Hough 变换示意图

考虑四种情况,平行四边形面积可表示为:  $\frac{N}{|\cos \theta|}$  或  $\frac{N}{|\cos \theta|}$ , 则积累单元数可表示为:

$$N_{cum} = \frac{N}{|\cos \theta|} \quad (19)$$

或

$$N_{cum} = \frac{N}{|\cos \theta|} \quad (20)$$

式中,  $N$  为雷达接收信号采样点数,  $\Delta \rho$  为的采样间隔.

在  $H_1$  假设时,目标回波为线性调频信号,其离散 Wigner-Ville 分布在时频面上表现为一定宽度的平行四边形. 假设其宽度为  $\tau$ , 若  $\frac{\Delta \rho}{\cos \theta} < \tau$ , 即其宽度大于采样间隔,则上述确定的积累点数  $N_{cum}$  为有效, 否则  $N_{cum}$  大于实际有效积累点数.

对于  $\theta$  和  $\xi$  的选择,原则上越小越好. 但为使在 Hough 面上使  $(\theta, \xi)$  在  $\theta$  方向和  $\xi$  方向扩展尽可能小,  $\theta$  和  $\xi$  应满足<sup>[15]</sup>:

$$\theta = \frac{N}{|\cos \theta|} \sin \left[ \frac{1}{2} \right] \quad (21)$$

式中,  $N$  为雷达接收信号采样点数,  $\Delta \rho$  为的采样间隔.

#### 5 检测性能仿真分析

下面对基于 Wigner-Hough 变换的线性调频信号检测性能进行了仿真分析.

##### 5.1 非起伏目标基于 Wigner-Hough 变换和基于傅立叶变换的相干积累对检测性能影响比较

仿真参数为:雷达波长为 8.6mm, 雷达接收信号时长为 5ms, 仿真采样周期为 0.05ms, Wigner-Ville 变换的频率单元数为 256,  $\theta$  和  $\xi$  的采样数均为 1000. 第一门限设为时频面上最大值的  $\frac{1}{5}$ , 最终虚警概率为  $10^{-3}$ . 图 2 给出当雷达-目标径向加速度分别为  $50\text{m/s}^2$ ,  $100\text{m/s}^2$ ,  $150\text{m/s}^2$  时,基于傅立叶变换(图中缩写为 FT)的相干积累处理和基于 Wigner-Hough 变换(图中缩写为 WHT)的相干积累处理对线性调频信号的检测能力曲线.

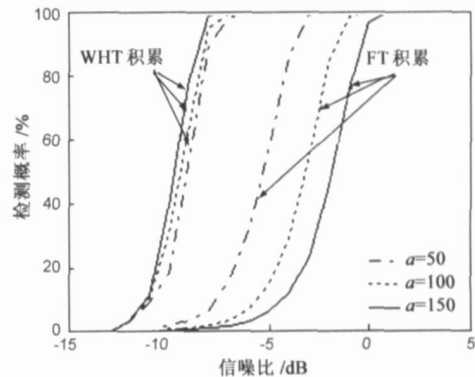


图 2 不同加速度情况下基于 FT 相干积累处理和基于 WHT 相干积累处理对线性调频信号的检测能力

从图 2 可以看出,当径向加速度分别为  $50\text{m/s}^2$ ,  $100\text{m/s}^2$ ,  $150\text{m/s}^2$  时,基于傅立叶变换的相干积累增益有减小的趋势,这一点已有文献<sup>[3]</sup>说明. 当径向加速度增大时,基于 Wigner-Hough 变换的相干积累增益有增大的趋势. 当加速度均大于 0 时,目标回波信号的时频图类似图 1 情况,积累单元数为  $N_{cum} = \frac{N}{\cos \theta}$ . 当加速度增大时,在目标回波的时频图上,  $\Delta \rho$  增大,  $\cos \theta$  减小,积累单元数  $N_{cum}$  增大,信噪比积累增大,因此检测性能提高. 这就是图 2 所示的加速度分别为 50、100、150 时,仿真得到的检测性能逐渐增加的原因.

当加速度为  $50\text{m/s}^2$  时,对于基于傅立叶变换的相干积累处理,要达到 80% 的检测概率,所需信噪比为 -4.2dB. 对于基于 Wigner-Hough 变换的相干积累处理,所需信噪比为 -8.3dB. 因此,基于 Wigner-Hough 变换的相干积累处理,相对于基于傅立叶变换的相干积累处理有 4.1dB 的积累增益. 当加速度为  $100\text{m/s}^2$  时,对于基于傅立叶变换的相干积累处理,要达到 80% 的检测概率,所需信噪比为 -2.2dB. 对于基于 Wigner-Hough 变

换的相干积累处理,所需信噪比为  $-8.5\text{dB}$ . 因此,基于 Wigner-Hough 变换的相干积累处理,相对于基于傅立叶变换的相干积累处理有  $6.3\text{dB}$  的积累增益. 当加速度为  $150\text{m/s}^2$  时,对于基于傅立叶变换的相干积累处理,要达到  $80\%$  的检测概率,所需信噪比为  $-0.8\text{dB}$ . 对于基于 Wigner-Hough 变换的相干积累处理,所需信噪比为  $-9\text{dB}$ . 因此,基于 Wigner-Hough 变换的相干积累处理,相对于基于傅立叶变换的相干积累处理有  $8.2\text{dB}$  的积累增益.

### 5.2 目标幅度起伏对检测性能的影响

雷达-目标径向加速度为  $150\text{m/s}^2$ ,其它仿真参数同上. 图 3 给出基于 Wigner-Hough 变换的相干积累处理对不同起伏类型目标的检测性能曲线.

从图 3 可以看出,当检测概率大于  $20\%$  时,起伏 2 类目标比其它类起伏目标需要的信噪比更小. 当检测概率大于  $50\%$  时,慢起伏目标(起伏 1 和起伏 3)需要的信噪比大于快起伏目标(起伏 2 和起伏 4). 由于 Wigner-Hough 变换完成了对相位的匹配处理,实现了相干积累,是多个脉冲幅度的直接累加,因此快起伏情况下的检测性能被平均. 在脉冲数足够多的情况下快起伏情况下的检测性能接近不起起伏目标情况.

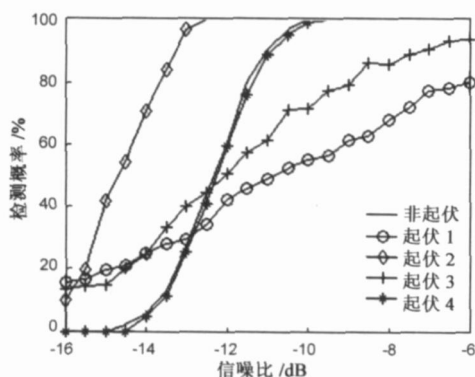


图 3 基于 Wigner-Hough 变换的相干积累处理对不同起伏类型目标的检测能力曲线

## 6 结论

针对弹载毫米波脉冲多普勒雷达接收到的目标回波信号为高重频的线性调频信号,本文分析了基于 Wigner-Hough 变换的线性调频信号的检测性能. 在接收信号为线性调频信号和接收信号时长无限的假设下,首先叙述了 Wigner-Hough 变换与广义似然比检验之间的联系,然后从理论上分析了双门限情况下线性调频信号的检测性能,给出了虚警概率和检测概率的数学表达式,然后对概率密度函数进行了合理近似,为弹载毫米波脉冲多普勒雷达设置合理的门限提供依据. 最后的计算机仿真比较了非起伏目标不同信噪比情况下基于傅立叶变换和基于 Wigner-Hough 变换的检测性能,

验证了后者相对前者具有的优势,并仿真了不同起伏类型目标基于 Wigner-Hough 变换的检测性能,为估算探测起伏目标的作用距离提供参考.

### 参考文献:

- [1] Currie N C, Brown C E. Principles and Applications of Millimeter Wave Radar [M]. Norwood, MA: Artech House, Inc., 1987.
- [2] 高烽. 多普勒雷达导引头信号处理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001, 3.
- [3] 赵宏钟, 付强. 雷达信号的加速度分辨性能分析 [J]. 中国科学 (E 辑), 2003, 33(7): 638 - 646.
- [4] Leon Cohen. Time-frequency distributions—a review [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(7): 941 - 981.
- [5] Pramod K Varshney, Donald D Weiner, Tzeta Tsao. Radar Signal Detection and Estimation Using Time-frequency Distributions [R]. New York: Rome Lab, 1995.
- [6] Guillermo C Gaunard, Hans C Strifors. Signal analysis by means of time-frequency (Wigner-type) distributions—applications to sonar and radar echoes [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(9): 1231 - 1248.
- [7] T A C Claassen, W F G. Mecklenbrauker. The Wigner distribution—a tool for time-frequency signal analysis part II [J]. Philips Journal of Research, 1980, 35(4): 276 - 300.
- [8] Douglas L Jones, Thomas W Parks. A resolution comparison of several time-frequency representations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(2): 413 - 420.
- [9] Barbarossa S, A Zanalda. A combined Wigner-Ville and Hough transform for cross-terms suppression and optimal detection and parameter estimation [A]. Proc ICASSP '92 [C]. San Francisco: IEEE Society, 1992. 173 - 176.
- [10] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1511 - 1515.
- [11] 刘建成, 杨建华, 周杰, 王国玉. 基于 Wigner-Hough 变换的线性调频信号检测性能 [J]. 信号处理, 2005, 21(4A): 546 - 549.  
Liu Jian-cheng, Zhou Jie, Wang Guo-yu. Detection performance of linear frequency modulated signals based on Wigner-Hough transform [J]. Signal Processing, 2005, 21(4A): 546 - 549. (in Chinese)
- [12] Gregory S Cunningham, William J Williams. Kernel composition of time-frequency distributions [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(6): 1425 - 1442.
- [13] Selin Aviyente, William J Williams. A centrosymmetric kernel decomposition for time-frequency distribution computation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(6): 1574 - 1584.

[14] James W Pitton. The statistics of time-frequency analysis[J].  
Journal of the Franklin Institute, 2000, (337) :379 - 388.  
[15] T M Van Veen, F C A Groen. Discretization errors in the

Hough transform[J]. Pattern Recognition, 1981, 14 (16) : 137  
- 145.

作者简介:



刘建成 男,1976年10月生于河南虞城,1998年7月于装备指挥技术学院获学士学位,2002年12月于国防科技大学电子科学与工程学院获硕士学位,现在读博士研究生.研究方向为:雷达信号处理、雷达电子战仿真与评估.  
E-mail:ljc-nymail@163.com



王雪松 男,1972年10月生于内蒙古包头市,1990年9月至1999年6月在国防科学技术大学电子科学与工程学院读书,获博士学位,发表国际国内论文100余篇,获得第四届全国优秀博士学位论文,合作出版专著2部,2003年被评为教授,指导和协助指导硕士生、博士生多名,2003被评为“全军十大学习成才标兵”.研究方向为:雷达信号处理与目标识别、综合电子战、

雷达系统仿真.

# 电子学报

2007年第6期 Acta Electronica Sinica No.6 2007

(总期 286 期) (Monthly) (Series No. 286)

主管单位	中国科学技术协会	China Association for Science and Technology
主办单位	中国电子学会	Published by the Chinese Institute of Electronics, Beijing
编辑	《电子学报》编辑委员会	Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica
主编	王守觉	Chief Editor: WANG Shou-jue
总编辑	刘力	Director: LIU Li
通信处	北京165信箱 (邮政编码 100036)	Add: Editorial Office of Acta Electronica Sinica (P O Box 165, Beijing 100036, China)
电话	(010)68279116, 68285082	Tel: 86-10-68279116, 68285082
传真	(010)68173796	Fax: 86-10-68173796

Home page: <http://www.elecjournal.org>; <http://dxu@chinajournal.net.cn>

Email: [cje@elecjournal.org](mailto:cje@elecjournal.org); [wanghui@ejournal.org.cn](mailto:wanghui@ejournal.org.cn)

排版印刷	北京新瑞铭印刷有限公司	Printed by Xinruiming Co. Ltd., Beijing, China
国内总发行	北京市报刊发行局	Distributed by Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司	Foreign: China International Book Trading Corporation
国内订购处	全国各邮电局	Subscription Office — All Local Post Offices in China

国内统一刊号: CN11 - 2087/ TN 邮发代号(国内/ 国外): 2 - 891/ M436 国内定价 32.00