

基于 Wigner-Hough 变换的径向加速度估计

刘建成, 王雪松, 肖顺平, 王国玉

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 雷达目标径向加速度是表征雷达和目标相对运动关系重要特征, 可用于机动目标跟踪、目标识别等, 因此研究直接从雷达回波估计径向加速度很有必要. 本文给出了基于 Wigner-Hough 变换的径向加速度估计算法和算法实现流程, 并分析了接收回波信号时长对加速度最小可分辨单元的影响, 最后进行了仿真试验, 仿真结果证实了该算法的有效性.

关键词: 径向加速度; 雷达回波; Wigner-Hough 变换; 估计

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)12-2235-04

Radial Acceleration Estimation Based on Wigner-Hough Transform

LIU Jiann cheng, WANG Xue song, XIAO Shun ping, WANG Guo-yu

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Radial acceleration of radar and target is a important character of the relative movement of them and can enhances maneuvering target tracking and target identification, so study on radial acceleration estimation directly from radar echo is needed. The algorithm of estimating radical acceleration is derived, estimation flow is provided, and the impact of observation interval on radial acceleration resolution is analyzed. Then simulation is carried out and results verify its efficiency.

Key words: radial acceleration; radar echo; Wigner-Hough transform; estimation

1 引言

在主动雷达系统中, 机动目标的雷达回波具有取决于雷达-目标的相对运动关系的非线性相位特性, 即恒定的速度产生恒频率项, 恒定的加速度产生恒线性调频项. 随着目标的机动性能越来越高, 雷达-目标之间产生很大的径向加速度. 径向加速度的引入, 一方面减弱了基于傅立叶变换的信号处理能力, 另一方面, 径向加速度含有重要信息, 可用于机动目标跟踪^[1]、目标识别^[2,3]和干扰识别^[1]等, 因此研究直接从雷达回波信号估计径向加速度会很有意义.

可利用现代估计技术(如卡尔曼滤波)根据雷达位置测量估计加速度^[4,5], 但加速度变化大时估计误差很大. 文献[3]建立了目标函数, 在速度和加速度变量空间计算目标函数, 使目标函数最大的速度、加速度值作为就是其估计值, 并用于火箭上升段状态估计, 但该方法的穷尽法搜索计算量会很大. 前人提出的其它估计加速度的方法还有文献[6~9], 这些方法均是利用最大似然估计根据目标回波信号相位估计加速度, 把最大似然估计转化为确定非线性似然函数的最大值, 其中, 文献[6,7]通过简化似然函数和计算先验均方误差限得到最大似然估计, 文献[8]通过搜索距离-速度模糊函数得到加速度等信息, 并提出用 Hough 变换实现快速搜索, 文献[9]提出了基于牛顿最优化的最大似然估计算法. 文献[10]提出了次最优估计算法, 减小了计算量.

雷达目标的径向加速度信息体现在雷达回波的调频率, 因此加速度的估计就体现在信号调频率的估计, 即线性调频信号调频率参数的估计. 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^[11~13]. 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^[11,14,15], 因而受到最多的重视. Wigner Ville 变换把雷达接收的一维时域信号转换成二维时频能量分布, 形状由信号频率调制决定. 对线性调频信号而言, WD 变换使信号能量集中在时频面上的一条直线上. 线性调频信号检测问题就转变为时频面内的直线检测问题, 因此模式识别技术可用于未知参数信号的检测和估计. 文献[16,17]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. 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. 然而该文献并没有给出具体的估计算法, 因此本文将研究基于 Wigner-Hough 变换径向加速度估计的算法实现.

本文首先给出 Wigner-Hough 变换的定义, 然后推导出基于 Wigner-Hough 变换的加速度估计算法, 给出实现流程, 并分析接收信号时长对加速度最小可分辨单元的影响, 最后进行仿真验证.

2 Wigner-Hough 变换

连续解析信号 $x(t)$ 的 Wigner Ville 分布^[14]为

$$W_x(t, w) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-jw\tau) d\tau \quad (1)$$

Hough 变换已广泛用于图像中直线的检测问题. 在图像 I 中(如图 1 所示), X - Y 坐标原点在图像中心. 若图像大小为 $N \times L$, 用 (t, f) 表示在该图像中的位置, 则 (x, y) 满足

$$x = t - \frac{N}{2} \quad (2)$$

$$y = f - \frac{L}{2} \quad (3)$$

对 Hough 变换采用标准参数化方法

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (4)$$

式中, ρ 为垂直于一条直线的过原点垂线的长度, θ 为垂直线与该垂线的夹角。

对图像 I 中的每一个

像素点 (x, y) , 经 Hough 变换对应着 (ρ, θ) 面内的一条正弦曲线, 其幅度对应着像素点 (x, y) 的强度。因此对图像 I 中的所有像素点, 经 Hough 变换后, 在 (ρ, θ) 面对应一束交织在一起的正弦函数。

换句话说, Hough 变换是

在图像 I 内沿直线积分, 积分值赋予点 (ρ, θ) , 而 ρ, θ 对应于该直线参数。因此, 如果在图像 I 中的一些像素点高度集中在一条直线上, 则在 (ρ, θ) 上必有一个峰值对应着该直线参数。

如果把 Hough 变换和 Wigner Ville 分布结合, 则形成一个新的变换称为 Wigner Hough 变换。长度为 T 的信号 $x(t)$ 的 Wigner Hough 变换为

$$WH_x(v_0, \beta) = \int_T W_x(t, v_0, \beta) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp[-j2\pi(v_0 + \beta)\tau] d\tau dt \quad (5)$$

3 匀加速目标雷达回波信号模型

假设目标为匀加速运动的点散射体, 发射信号包络为 $u(t)$, 雷达回波信号模型可表示为

$$s(t) = Au(t - \tau) \exp[-j2\pi f_0(t - \tau)] \quad (6)$$

式中, A 为回波信号幅度, 假设是恒定的, f_0 为信号载频, τ 为时延, 且为时间的函数, 可表示为

$$\tau = 2 \frac{R_0 - vt - (1/2)at^2}{c} \quad (7)$$

式中, R_0 为初始距离, v 为初始径向速度, a 为径向加速度, c 为光速。

式(7)代入式(6), 整理后得到

$$s(t) = Au(t - \tau) \exp(-j2\pi f_0 t) \cdot \exp(j4\pi f_0 R_0/c) \cdot \exp(-j2\pi f_0 \tau) \cdot \exp(-j2\pi(a_d/2)t^2) \quad (8)$$

式中, 多普勒频率 $f_d = \frac{2v}{\lambda}$, 多普勒变化率 $a_d = \frac{2a}{\lambda}$, λ 为雷达工作波长。

混频后, 信号可表示为

$$s(t) = Au(t - \tau) \exp(-j\varphi_0) \cdot \exp(-j2\pi f_d t) \cdot \exp(-j2\pi(a_d/2)t^2) \quad (9)$$

考虑附加噪声, 忽略包络形状变化影响, 接收间隔 T 内的采样信号可表示为

$$x(n) = A \exp(-j\varphi_0) \exp(-j2\pi f_d n \Delta T) \exp(-j2\pi(a_d/2)(n\Delta T)^2 + w(n)), \quad 1 \leq n \leq N \quad (10)$$

式中, ΔT 为采样周期, N 为采样个数, 且满足 $N \cdot \Delta T = T$, $w(n)$ 为复高斯白噪声。

4 径向加速度估计算法

对于式(10)这样的离散采样信号, 其 Wigner Ville 分布在 (t, f) 二维面上对应着一条由离散点组成的直线, 该直线与频率轴的交点对应的频率近似为 f_d , 调频率近似为 a_d , 频率单元长度为 L 的 Wigner Ville 分布在时间轴上的时间分辨单位为 ΔT , 在频率轴上的频率分辨单元为 Δf , 且

$$\Delta f = \frac{1}{2L\Delta T} \quad (11)$$

式中, L 为频率单元长度, ΔT 为信号采样周期。再经 ρ 采样数为 M 、 θ 采样数为 K 的 Hough 变换, 在二维平面上必有一最大值, 假设该最大值点出现在 (ρ_0, θ_0) 处。

由图 1 可知, 当 $\theta_0 < \pi$ 时, $\xi = \theta_0$, 直线的斜率为 $\tan \xi = \tan \theta_0$ 。若 f 轴上有 K_f 个采样点, 则在 t 轴上必有 K_t 个采样点, 使满足 $\tan \xi = \frac{K_f}{K_t}$, 因此调频率 a_d 与 (ρ_0, θ_0) 的关系可表示为

$$a_d = \frac{K_f \Delta f}{K_t \Delta T} = \tan \xi \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T} = \tan \theta_0 \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T} \quad (12)$$

由此可确定径向加速度 a 与 (ρ_0, θ_0) 的关系为

$$a = \frac{\lambda}{2} \cdot \tan \theta_0 \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T} \quad (13)$$

当 $\theta_0 \geq \pi$ 时, $\xi = \theta_0 - \pi$, 直线的斜率为: $\tan \xi = \tan(\theta_0 - \pi) = \tan \theta_0$ 。由此可知确定径向加速度与式(13)相同。因此, 无论是对正调频雷达接收信号还是负调频雷达接收信号, 径向加速度估计公式 $\hat{a} = \frac{\lambda}{2} \cdot \tan \theta_0 \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T}$ 均成立。

估计初始速度的方法与估计加速度的方法类似, 根据图示几何关系估计出多普勒频率及初始速度, 多普勒频率 f_d 与 (ρ_0, θ_0) 的关系可表示为

$$f_d = \left[\frac{L}{2} - \frac{N}{2} \tan \theta_0 + \frac{\rho_0}{\cos \theta_0} \right] \Delta f \quad (14)$$

由此可确定初始径向速度 v 与 (ρ_0, θ_0) 的关系为

$$v = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{L}{2} - \frac{N}{2} \tan \theta_0 + \frac{\rho_0}{\cos \theta_0} \right] \Delta f \quad (15)$$

式中, L 为 Wigner Ville 分布的频率单元长度, N 为信号采样个数, Δf 为 Wigner Ville 分布的频率分辨率。

因此, 根据雷达回波信号估计径向加速度实现流程如下:

(1) 对回波信号进行频率单元长度为 L 的 Wigner Ville 变换;

(2) 再计算 ρ 采样数为 M 、 θ 采样数为 K 的 Hough 变换;

(3) 确定最大值对应的 ρ_0 和 θ_0 ;

(4) 根据式(11)确定 Wigner Ville 分布的频率分辨率 Δf ;

(5) 分别根据式(12)和(14)估计 a_d 和 f_d ;

(6) 最后估计加速度 a 和初始速度 v 。

该加速度估计算法同样适用于多目标情况, 有几个目标就在 (ρ, θ) 二维面上出现几个极值。实现多目标情况的关键

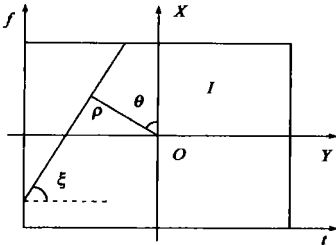


图 1 Hough 变换示意图

是找到 Wigner Hough 变换的极大值。

5 接收信号时长对加速度最小可分辨单元的影响

当雷达波长一定时, 根据加速度估计公式(13)分析接收信号时长对加速度最小可分辨单元的影响。

在式(13)中, 令 $\theta_0 = \theta$, 然后关于 θ 求微分得到

$$\Delta a = \frac{\lambda}{2} \frac{(1 + \tan^2 \theta) \Delta \theta}{\Delta T} \Delta f \quad (16)$$

把 $\Delta \theta = \frac{2\pi}{K}$ 和 $\Delta f = \frac{1}{2L\Delta T}$ 代入上式, 并令 $K = k \cdot N$ (k 为常数), $L = l \cdot N$ (l 为常数)得到

$$\Delta a = \frac{\lambda}{2} \frac{\pi}{k \cdot l \cdot (N\Delta T)^2} (1 + \tan^2 \theta) = \frac{\lambda}{2} \frac{\pi}{k \cdot l \cdot T^2} (1 + \tan^2 \theta) \quad (17)$$

上式当 $\theta = 0$ 时达到最小, 即加速度最小可分辨单元为

$$\Delta a_{\min} = \frac{\lambda \pi}{2 \cdot k \cdot l \cdot T^2} \quad (18)$$

由上式可以看出, 加速度最小可分辨单元跟信号时长的平方成反比, 因此要提高加速度最小可分辨单元需要延长信号接收时间。同时, 在一定范围内, 通过增大 l, k 也可以提高加速度最小可分辨单元。

6 仿真试验

为了验证估计算法和分析的有效性, 我们进行了仿真试验。

6.1 加速度估计分辨率仿真验证

仿真参数: 雷达波长为 0.008m, 雷达接收信号时长为 50ms, 采样周期为 0.05ms, $N = 1000, M = 1000$ 。不考虑噪声影响时, 表 1 给出了 l, k 在不同取值情况下对速度和加速度的估计。

表 1 l, k 在不同取值情况下的速度和加速度估计

	真实速度 (m/s)	估计速度 (m/s)	真实加速度 (m/s ²)	估计加速度 (m/s ²)
$l = 0.5115$ $k = 1$	20	20.1286	100	98.2057
	20	19.9686	105	108.0561
	20	20.1001	110	108.0561
	20	19.9834	115	117.9151
$l = 0.5115$ $k = 2$	20	20.1286	100	98.2057
	20	20.0486	102	103.1299
	20	20.0925	104	103.1299
$l = 1.0230$ $k = 1$	20	20.0124	106	108.0561
	20	20.0300	100	98.5952
	20	19.9587	102	103.5811
$l = 1.0230$ $k = 2$	20	20.0141	104	103.5811
	20	19.9423	107	108.5754
	20	19.9666	100	101.0872
$l = 1.0230$ $k = 4$	20	20.0221	102	101.0872
	20	19.9864	103	103.5811
	20	19.9505	105	106.0772
$l = 1.0230$ $k = 4$	20	19.9983	100	99.8409
	20	19.9944	101	101.0872
	20	19.9904	102	102.3339
$l = 1.0230$ $k = 4$	20	20.0181	103	102.3339

从表 1 可以看出, 真实加速度改变时, 仿真得到的加速度估计值最小变化间隔可近似认为恒定, 因此, 加速度的估计值可看作真实加速度的离散采样值, 采样间隔为加速度最小可分辨单元。根据表 1 所示仿真结果确定的加速度最小可分辨单元及根据对于 l, k 不同取值情况由式(18)确定的加速度最小可分辨单元, 如表 2 所示。

表 2 加速度最小可分辨单元仿真结果与理论计算比较

	仿真结果(m/s ²)	理论计算(m/s ²)
$l = 0.5115 \quad k = 1$	9.8547	9.8271
$l = 0.5115 \quad k = 2$	4.9252	4.9135
$l = 1.0230 \quad k = 1$	4.9901	4.9135
$l = 1.0230 \quad k = 2$	2.4950	2.4568
$l = 1.0230 \quad k = 4$	1.2465	1.2284

从表 2 可以看出, 仿真结果得到的加速度最小可分辨单元跟理论分析得到的加速度最小可分辨单元结论一致。而理论值略小于仿真值是因为式(18)忽略了 $\tan^2 \theta$ 影响。

6.2 噪声条件下速度和加速度估计仿真验证

仿真参数: 雷达波长为 0.008m, 雷达接收信号时长为 50ms, 采样周期为 0.05ms, $N = 1000$, 雷达-目标初始径向速度为 20m/s, 径向加速度为 100m/s², $l = 1.023, k = 4, M = 1000$ 。

当信噪比为 -15dB 时, 20 次仿真得到的速度估计值均为 19.9666m/s² 或 19.9983m/s², 加速度估计值均为 99.8409m/s² 或 101.0872m/s²。雷达接收信号实部和信号的 Wigner-Hough 变换结果分别如图 2、图 3 所示。从图 2、图 3 可以看出, 信噪比很低的雷达接收信号经 Wigner-Hough 变换后能很容易检测到目标, 并估计其相对运动参数。

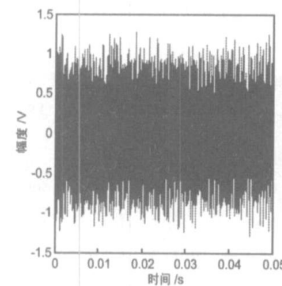


图 2 雷达接收目标回波信号实部

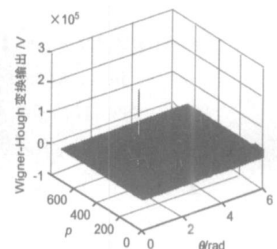


图 3 接收信号 Wigner-Hough 变换结果

由上述仿真结果和表 1 可看出, 有噪声时的真实加速度为 100m/s² 的估计值是无噪声时真实加速度为 99m/s² 和 100m/s² 的两个估计值之一。由于上述仿真参数决定的加速度最小可分辨单元远大于回波信噪比影响的加速度估计精度, 因此在已检测到目标的前提下, 加速度估计值与真实加速度的偏离主要由加速度最小可分辨单元决定。

7 结论

本文研究了直接从雷达回波估计径向加速度问题, 提出了基于 Wigner Hough 变换的径向加速度估计算法, 给出了估计算法实现流程, 该算法对单目标情况和多目标情况均有效, 然后分析了接收信号时长对加速度最小可分辨单元的影响,

并指出要提高加速度最小可分辨单元必须延长信号接收时间,最后进行了仿真验证,仿真结果证实了该算法的有效性.下一步要的工作是分析该估计算法在高斯白噪声环境下的估计性能和回波幅度非恒定时对估计精度的影响.

参考文献:

- [1] Guy Morris, Linda Harkness. Airborne Pulsed Doppler radar [M]. Norwood, Massachusetts: Artech House Publishers, 1996.
- [2] 苏晋,张军,付强.基于多普勒像和加速度像的多目标鉴别[J].现代雷达,2002,23(6):43-45.
- [3] Eric L Crosson, J Brent Romine, Dieter Willner. Boost phase acceleration estimation[A]. IEEE International Radar Conference[C]. New York: IEEE AES Society, 2000. 210-214.
- [4] Bar Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and Data Association [M]. Orlando: Academic Press, 1988.
- [5] 周宏仁,敬忠良,王培德.机动目标跟踪[M].北京:国防工业出版社,1991.
- [6] P Bello. Joint estimation of delay, Doppler and Doppler rate [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1960, 6(3): 330-341.
- [7] E Kelly. The radar measurement of range, velocity and acceleration[J]. IRE Transactions on Military Electronics, 1961, 6(2): 51-57.
- [8] Theagenis J Abatzoglou, Gregory O Gheen. Range, radial velocity and acceleration MLE using radar LFM pulse train[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1070-1084.
- [9] Theagenis J Abatzoglou. Fast maximum likelihood joint estimation of frequency and frequency rate[J]. IEEE ICASSP PROC, 1986, 11(1): 708-715.
- [10] Shimon Peleg, Boaz Porat. Linear FM signal parameter estimation from discrete time observations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 1991, 27(4): 607-616.
- [11] Leon Cohen. Time frequency distributions a review[J]. Proceeding of the IEEE, 1989, 77(7): 941-981.
- [12] Pramod K Varshney, Donald D Weiner, Tzeta Tsao. Radar Signal Detection and Estimation Using Time Frequency Distributions[R]. France: Rome Lab, 1995.
- [13] Guillermo C Gaunaud, Hans C Strifors. Signal analysis by means of time frequency (Wigner Type) distributions applications to sonar and radar echoes[J]. Proceeding of the IEEE, 1996, 84(9): 1231-1248.
- [14] T A C Claasen, W F G Mecklenbrauker. The Wigner distribution a tool for time frequency signal analysis[J]. Philips Journal of Research, 1980, 35(3): 217-250.
- [15] 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.
- [16] S Barbarossa, A Zanalda. A combined Wigner-Ville and Hough transform for cross terms suppression and optimal detection and parameter estimation[J]. IEEE ICASSP Proc, 1992, 5(1): 173-176.
- [17] S Barbarossa. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner Hough transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1511-1515.

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,现为博士研究生,研究方向为:雷达信号处理、雷达电子战仿真与评估。
E-mail: ljcmymail@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,在国内外发表论文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年被评为“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。