

基于霍夫变换的高速微弱目标检测算法

庞存锁 侯慧玲* 韩焱

(中北大学电子测试技术国家重点实验室仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 该文针对高速微弱目标检测提出一种快速的目标参数估计方法,首先分析了高速目标回波脉冲间距离单元走动的影响因素,指出回波间距离走动与积累时间近似为直线;其次利用霍夫变换(HT)可对直线进行检测的特点,分析了HT参数和目标初始距离和径向速度的关系,提出了一种并行HT(PHT)方法,该方法利用并行叠加原理能够提高HT运算速度,满足实时性的要求;最后给出了算法实现流程和仿真实例,仿真结果证明了算法的有效性。

关键词: 微弱目标检测;目标参数估计;并行霍夫变换

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)03-0754-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00621

High-speed Weak Target Detection Based on Hough Transform

Pang Cun-suo Hou Hui-ling Han Yan

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For high-speed weak targets, a fast method of target parameter estimation is presented in this paper. After analyzing the factors which influence high-speed target's range migration, it pointed out that the range migration exhibits a straight line with accumulation time. Then, using the feature of Hough Transform (HT) to detect straight line, the relationship between the parameters of HT and initial distance and initial radial velocity are analyzed and an improved method is proposed based on Parallel HT (PHT) which can improve operation speed and meet the needs of real-time processing by taking advantage of its parallel principle. Finally, the algorithm flowchart is given and the validity of this algorithm is verified with the simulation results.

Key words: Weak target detection; Target parameter estimation; Parallel Hough Transform (PHT)

1 引言

随着科学技术的发展,尤其是隐身技术和超音速技术的日渐成熟,具有隐身和高速性能的飞行器越来越多,研究提高传统雷达对高速微弱目标检测能力的信号处理方法具有重要意义。为了检测高速微弱目标,长时间相参积累技术是一种有效方法^[1],但长时间积累导致目标回波包络在不同脉冲周期之间走动,传统的基于单元的动目标检测方法已不能有效适应该类目标的检测,需在检测前进行回波包络对齐。针对包络对齐的问题已经有不少研究,文献[2-4]研究了包络移位和包络插值的包络对齐方法;文献[5-8]研究了基于Keystone变换的包络对齐方法,但该方法存在速度模糊;文献[9]研究了基于脉冲压缩前的距离走动补偿方法,但存在补偿通道多的问题。文献[10]利用最大似然准则的方法研究了

包络对齐,并提出利用霍夫变换的方法估计高速目标的思想,但文中没有分析HT的具体运算过程,且存在运算量大的问题。

以上研究方法虽然能够实现包络对齐,但运算量大,实时性差。为此,本文以线性调频脉冲压缩雷达为例,提出了一种并行HT(PHT)方法,此方法利用叠加原理能够提高运算速度,满足实时性的要求;最后给出了仿真实例,仿真结果表明了算法的有效性。

2 高速目标回波信号特点

针对线性调频脉冲压缩雷达,根据文献[9, 10]可得第 n 个回波信号的包络时延走动 $\Delta\tau_n$ 与目标速度、加速度等有关,可表示为

$$\Delta\tau_n = \beta_0 nPRT + \frac{a}{c}(nPRT)^2 \quad (1)$$

式中 $\beta_0 = 2v_0/c$ 为目标时延变化率, v_0 为目标速度, a 为加速度, c 为光速,PRT为脉冲重复周期。其中:

(1) $\beta_0 nPRT$ 表示由速度引起的第 n 个脉冲相对

2011-06-26 收到, 2011-11-17 改回

山西省青年科技研究基金(2009021019-2)和中北大学校院基金及科学仪器与动态测试教育部重点实验室青年基金资助课题

*通信作者: 侯慧玲 hou_huilin@126.com

于第1个脉冲的走动时延，其导致的距离走动单元为

$$Rb_1 = \beta_0 B n PRT \quad (2)$$

(2) $a/c(nPRT)^2$ 表示由加速度引起的第 n 个脉冲相对于第1个脉冲的走动时延，其导致的距离走动单元为

$$Rb_2 = aB(nPRT)^2/c \quad (3)$$

需注意通常加速度引起的距离走动可以忽略，如信号带宽为5 MHz，停留时间为0.5 s，根据式(3)知加速度要想产生1个距离单元的走动需大于240 m/s^2 ，一般目标的加速度不可能达到这么大，故可忽略其对距离走动的影响。因此，高速目标回波间的距离走动主要由速度引起，且走动单元与积累时间近似为直线。

3 基于 HT 的高速目标检测

3.1 HT 检测高速目标速度和距离的基本原理

高速目标回波信号离散采样后，其目标速度 v_0 ，距离 R_0 与直线斜率 k 、截距 b 的关系可表示为

$$k = (c/2f_s)/(v_0 PRT) \quad (4)$$

$$b = (2R_0/c)f_s \quad (5)$$

根据式(4)，式(5)可得目标初始距离，径向速度与极径，极角间的关系为

$$v_0 = c/[2f_s PRT \cot(\theta_0)] \quad (6)$$

$$R_0 = \rho_0/[\sin(\theta_0)] \cdot c/(2f_s) \quad (7)$$

其中 $v_0 < 0$ 表示目标接近雷达， $v_0 > 0$ 表示目标远离雷达， f_s 为采样频率， (ρ_0, θ_0) 为 HT 后最大值对应的极坐标值。

3.2 极径 ρ 和极角 θ 的量化间隔

从高速目标的回波特点出发，我们推导了极径量化间隔 $\Delta\rho$ ，极角量化间隔 $\Delta\theta$ 的值。

由文献[9]可得搜索未知高速目标时的速度间隔可表示为

$$\Delta v \approx 0.68c/BNT \quad (8)$$

其中 BNT 为发射信号带宽与积累脉冲时间的乘积。

将式(8)代入式(4)，式(6)可得 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta \approx \cot^{-1} \left(\frac{c}{2f_s PRT} \cdot \frac{\Delta v}{v_0(v_0 + \Delta v)} \right) \quad (9)$$

假定高速目标回波脉冲间的距离走动单元最大不超过一个距离分辨单元，可得 $\Delta\rho$ 为

$$\Delta\rho \approx [c/(2B)] \sin(\Delta\theta) \quad (10)$$

3.3 一种基于并行运算的 HT 方法(PHT)

HT 虽能够检测直线，但文献[10]中的方法运算量大，难以满足实际应用。这里借鉴文献[11]中计算 HT 的思想对目标回波矩阵进行处理。

(1)PHT 原理

引理 利用如图1所示的 PHT 几何关系，可得

$$HT(A, o) = HT(A, o') + HT(o', o) \quad (11)$$

证明 如图1(a)所示，设 l 为穿过坐标系 XoY 中 A 点的直线， $\rho_o(A, \theta)$ 为从原点 o 到 l 的垂线， θ 为垂线和坐标轴 X 的夹角。 o' 点为数据矩阵中的另一点， $\rho_o(o', \theta)$ 为从原点 o 到 h 的垂线，这里设 h 为穿过 o' 点的直线，且 $h \parallel l$ ， $\rho_{o'}(A, \theta)$ 为从 o' 点到 l 的垂线，其对应的坐标系为 $x'o'y'$ ，如图1(b)所示。

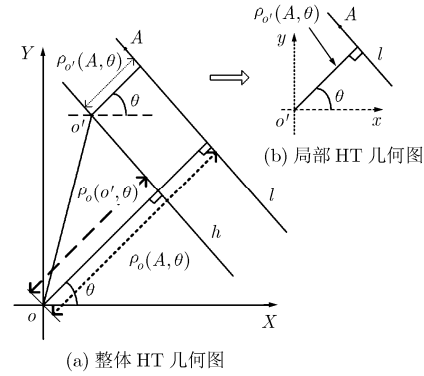


图1 PHT 几何关系图

由 HT 的定义可得，坐标系 XoY 中 A 点， o' 点相对于原点 o 的 HT 可分别表示为

$$\rho_o(A, \theta) = A_X \cos(\theta) + A_Y \sin(\theta) \quad (12)$$

$$\rho_o(o', \theta) = o'_X \cos(\theta) + o'_Y \sin(\theta) \quad (13)$$

其中 (A_X, A_Y) ， (o'_X, o'_Y) 分别为点 A 和点 o' 在坐标系 XoY 中的坐标。

在图1(b)坐标系 $x'o'y'$ 中， A 点相对于点 o' 的 HT 可分别表示为

$$\rho_{o'}(A, \theta) = A_x \cos(\theta) + A_y \sin(\theta) \quad (14)$$

其中 (A_x, A_y) 为点 A 在坐标系 $x'o'y'$ 中的坐标。

由图1几何关系及式(12)–(14)可得

$$\rho_o(A, \theta) = \rho_o(o', \theta) + \rho_{o'}(A, \theta) \quad (15)$$

式(15)也可表示为式(11)的形式，这一方法可推广为直线上某一点关于坐标原点的 HT 可用任意多个点 HT 的叠加表示。因此，该方法利于并行运算，可减小 HT 的运算时间。

(2)PHT 的应用 式(15)证明了点的 HT 叠加原理，这一部分将讨论该原理在雷达回波矩阵中的应用。

为了应用该原理，需对回波矩阵进行子矩阵分解。设雷达回波矩阵 $[M, N]$ 可分为 $k_1 \times k_2$ 组子矩阵，即 $[M, N]$ 可表示为

$$[M, N] = \sum_{k_1, k_2} \left[\begin{array}{c} M \\ k_1 \\ N \\ k_2 \end{array} \right]_{o_i, j}, \quad 1 \leq k_1 \leq M, \quad 1 \leq k_2 \leq N, \quad 0 \leq i < k_1, \quad 0 \leq j < k_2 \quad (16)$$

其中 $\left[\begin{matrix} M & N \\ k_1 & k_2 \end{matrix} \right]_{o'_{(i,j)}}$ 为 $[M, N]$ 分解后的子矩阵, $o'_{(i,j)}$ 为子矩阵的参考坐标原点, 一般选择子矩阵左下角单元的点。

由式(15), 式(16)可得 $k_1 \times k_2$ 组子矩阵的并行 HT 叠加过程可表示为

$$HT_{M \times N}[(x_M, y_N), o] = HT_{k_1 \times k_2}[(x_M/k_1, y_N/k_2)_{o'_{(i,j)}}] + HT[o'_{(i,j)}, o] \quad (17)$$

其中 $HT_{M \times N}[(x_M, y_N), o]$ 表示为回波矩阵 $[M, N]$ 中元素相对于坐标原点 o 的 HT, (x_M, y_N) 为矩阵 $[M, N]$ 中元素相对于点 o 的坐标, $HT_{k_1 \times k_2}[\cdot]$ 和 $HT[\cdot]$ 中参数解释与其类似。

另外, 由式(15)可知, 如果 HT 处理的回波矩阵能分解为大小相等的几组子矩阵, 则每组子矩阵中相同位置点的 HT 相同, 则式(17)可进一步表示为

$$HT_{M \times N}[(x_M, y_N), o] = HT_{k_1 \times k_2}[(x_M/k_1, y_N/k_2)_{o'_{(i,j)}}] + HT[o'_{(i,j)}, o] \quad (18)$$

式(18)的这一性质可节约存储空间并能提高 HT 计算效率。

4 仿真实例

设观测目标相对于雷达的初始距离为 100 km,

径向速度为 3000 m/s, 加速度为 5 m/s², 信号载频为 3 GHz, 基带信号带宽为 5 MHz, 积累脉冲数为 128, 脉冲重复周期为 1 ms, 采样频率为 10 MHz, 脉冲宽度为 0.1 ms, 噪声为复高斯白噪声。

4.1 PHT 对高速目标的检测流程

根据上述参数, 由式(16)可把回波矩阵 $[M, N]$ 分为 4 个 165×64 的子矩阵, 其中行代表目标的距离单元数, 列代表回波脉冲数。图 2 为 PHT 对 4 个子阵的执行过程。图 2(a)为采用文献[10]方法处理的结果, 图 2(b)为采用 PHT 处理过程。从图 2(b)可看出, 子阵 I, II, IV 中 3 维图的峰值比较明显, 且对应的 2 维投影交点位置相同, 这与直线 l 分布在图 2(a)中 I, II, IV 区的情况相吻合。图 2(c)为 4 个子阵执行 PHT 后的 3 维显示结果, 与图 2(a)处理结果相同, 验证了 PHT 的正确性。

4.2 PHT 检测性能

为了验证算法性能, 本节采用峰值检测方法比较了文献[4]中包络插值, 文献[7]中 Keystone 及本文算法在不同信噪比下对目标初始距离、径向速度的检测概率。经过 200 次 Monte Carlo 仿真实验, 从图 3 可看出包络插值和 Keystone 算法检测性能基本一致, 在信噪比低于 -40 dB 时, 检测性能略高于本文方法, 这是由于本文算法为了减少搜索次数所取量化间隔略大于其它两种方法。图 4 给出了目标在

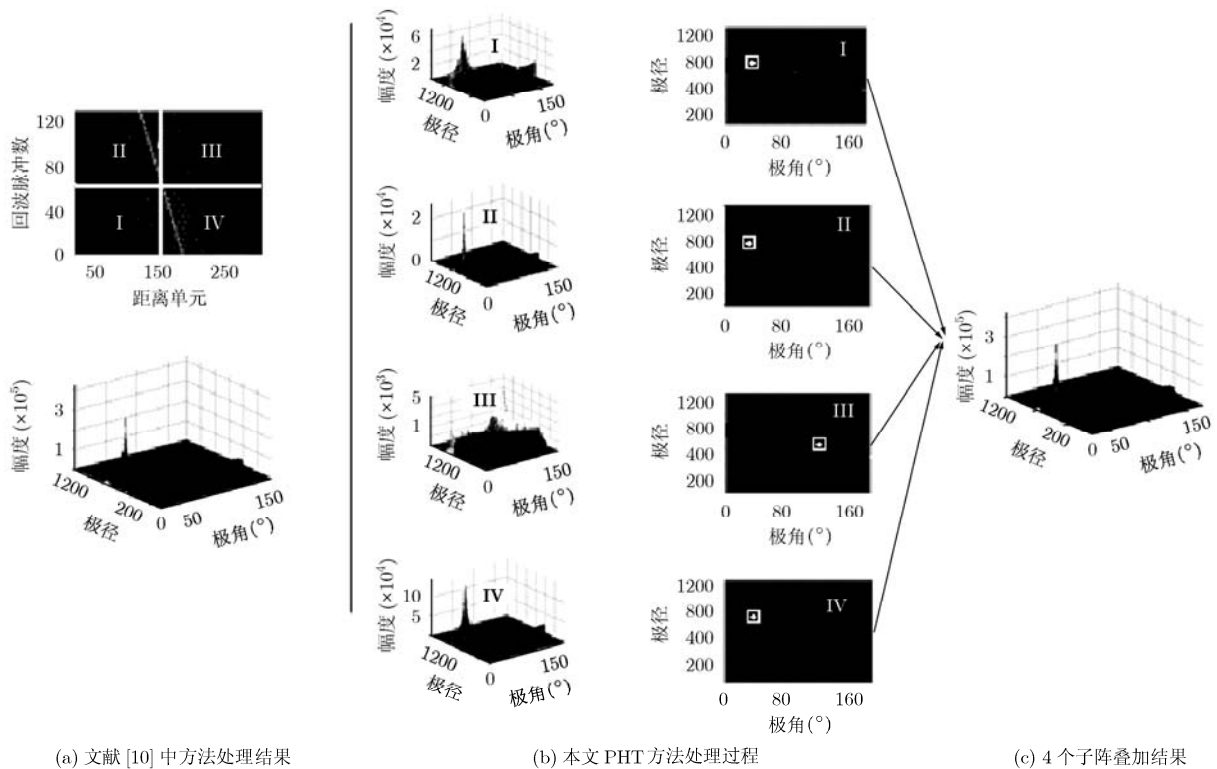


图 2 PHT 的执行过程示意图

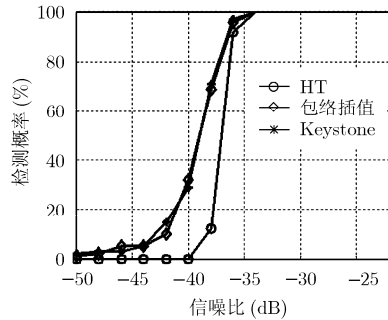


图 3 3 种算法检测性能比较

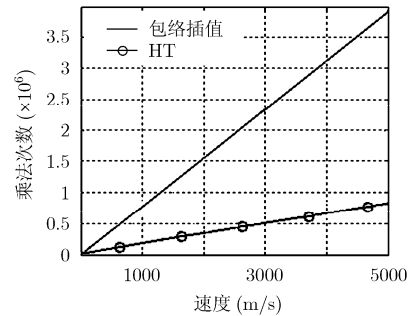


图 4 包络插值和 HT 算法复乘次数比较

不同速度下本文方法与包络插值方法复乘次数的比较, 从图 4 可看出包络插值与本文算法所用的复乘次数在一个数量级上, 但本文方法采用了分解并行运算, 故运算时间比包络插值约低 4 倍, 且随着分解子矩阵的增多, 可进一步提高运算速度, 满足实际应用。

5 结论

目标高速运动引起回波在脉冲间走动, 影响雷达检测性能。本文提出了一种并行 HT 的高速目标检测方法, 该方法适合于对高加速目标进行检测, 同时能提高算法的实时性。文中结合实际应用, 仿真比较了并行 HT 方法与包络插值、Keystone 方法对高速目标的检测性能, 指出在检测性能相同的情况下, 本文方法复乘次数较其它方法少, 且随着分解子矩阵的增多, 可进一步减少运算时间。

参考文献

- [1] 张月, 邹江威, 陈曾平. 泛探雷达长时间相参积累目标检测方法研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 15-20.
Zhang Yue, Zou Jiang-wei, and Chen Zeng-ping. Long-time coherent integration targets detection method for ubiquitous radar[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2010, 32(6): 15-20.
- [2] Chen C and Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(1): 2-14.
- [3] Wang K, Luo L, and Bao Z. Global optimum method for motion compensation in ISAR imagery[C]. Proceeding Conference Radar'97, Edinburgh, UK, 1997(10): 233-235.
- [4] Wang G Y and Bao Z. The minimum entropy criterion of range alignment in ISAR motion compensation[C]. Proceeding Conference Radar'97, Edinburgh, UK, 1997(10): 236-239.
- [5] Perry R P, DiPietro R C, and Fante R L. SAR imaging of moving targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and*

Electronic Systems, 1999, 35(1): 188-200.

- [6] Zhu D, Li Y, and Zhu Z. A keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 18-22.
- [7] 苏军海, 刑孟道, 保铮. 宽带机动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1283-1287.
Su Jun-hai, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Wideband radar detection for maneuvering target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1283-1287.
- [8] 秦国栋, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 一种多载频 MIMO 雷达高速运动目标多维参数估计方法[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2763-2768.
Qin Guo-dong, Chen Bai-xiao, Chen Duo-fang, et al. A method of multiple parameters estimation for high speed moving targets in multi-carrier-frequency MIMO radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2763-2768.
- [9] Tao R, Zhang N, and Wang Y. Analysing and compensating the effects of range and Doppler frequency migrations in linear frequency modulation pulse compression radar [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(1): 12-22.
- [10] Theagenis J A and Gregory O G. Range, radial velocity, and acceleration MLE using radar LFM pulse train [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(4): 1070-1084.
- [11] Satzoda R K, Suchitra S, and Srikanthan T. Parallelizing the Hough transform computation [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2008, 15(2): 297-300.

庞存锁: 男, 1978 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。

侯慧玲: 女, 1981 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为图像、雷达信号处理、精密仪器测试。

韩焱: 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理、无损检测以及信息对抗等方面。