

基于坐标变换与随机 Hough 变换的抛物线运动目标检测算法

曲长文 黄勇 苏峰 何友

(海军航空工程学院电子工程系 烟台 264001)

摘要: 该文提出了一种在雷达坐标平面中检测匀加速机动目标抛物线轨迹的新算法。该算法将抛物线方程的坐标变换与随机 Hough 变换三点检测法结合起来检测任意方向的抛物线轨迹, 并利用所检测到的点迹的速度信息来消除虚假目标。Monte Carlo 仿真表明, 在密集杂波条件下, 高检测概率会带来高的虚警概率; 而在稀疏杂波条件下, 检测效果比较好。

关键词: 随机 Hough 变换, 抛物线, 曲线检测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)10-1573-03

An Algorithm of Detecting Moving Target with Parabolic Track Using Coordinate Transform and Randomized Hough Transform

Qu Chang-wen Huang Yong Su Feng He You

(Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract This paper proposes a new algorithm of detecting target with constant acceleration along parabolic track on the radar coordinate plane. This algorithm combines coordinate transformation of the parabolic equation and three-point detection algorithm based on randomized hough transform to detect parabolic tracks in any orientation, and employs the velocity information of detected tracks to delete false alarms. Monte Carlo simulation shows that higher detection probability goes with higher false alarm probability in the background of heavy clutters; however in the background of sparse clutters, the detection performance is better.

Key words Randomized Hough transform, Parabolic curve, Curve detection

1 引言

Hough变换是Hough^[1]于1962年在图像特征检测领域提出的一种几何基元提取方法。经过多年的发展, 1994年, Carlson等人^[2]成功地将Hough变换法应用到搜索雷达中检测直线运动或近似直线运动的低可观测目标。但是当目标发生机动而呈曲线运动时, 存储量和计算量上的负担限制了Hough变换的应用。为了解决Hough变换的这一缺陷, 一方面, 深入研究曲线的特性, 尽可能地减少表征该类曲线所需的参数个数^[3]。另一方面, 研究新的基于Hough变换思想的算法, 尽可能地提高算法的性能。例如, Xu等人^[4]提出的随机Hough变换(RHT)采用多到一映射, 避免了传统Hough变换一到多映射的庞大计算量; 采用动态链表结构, 只对多到一映射所得到的参数分配单元进行积累, 从而降低了内存需求, 并使得RHT具有参数空间无限大, 参数精度任意高, 时间和空间复杂度低等优点。但是, 当处理的图像比较复杂,

需要检测的参数比较多时, 直接应用RHT会引入大量的无效采样和累积, 所以有必要将上述两个方面结合起来考虑。另外, 在降低曲线参数空间维数的方法中, 通常要利用曲线的边缘梯度信息。而对于运动目标及其环境所形成的雷达数据图而言, 边缘梯度信息是无法利用的, 因此, 在雷达数据图中检测运动目标的曲线轨迹将是一件更困难的事情。本文针对K分布杂波加热噪声背景下匀加速机动目标的抛物线轨迹的检测问题, 提出了将抛物线坐标变换与RHT相结合检测雷达目标的新算法, 并简单地分析了算法的检测效果。

2 X-Y 平面中匀加速运动目标的轨迹方程

设目标初始状态为 $(x_0, v_{0x}, a_x, y_0, v_{0y}, a_y)$, 其中加速度 a_x 和 a_y 都是常量, 且 $a_x \neq a_y \neq 0$, $v_{0x} \neq v_{0y}$ 。那么, 目标的运动方程为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \end{pmatrix} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \cdot t^2 \quad (1)$$

由物理学的原理可知,当目标速度方向与加速度方向不同在一条直线上时,目标的匀加速运动轨迹是一条抛物线,记为

$$ax^2 + 2hxy + by^2 + 2gx + 2fy + c = 0 \quad (2)$$

其中二次项系数满足关系式: $h^2 - ab = 0$ 。

从式(2)中可以看出,若将 RHT 直接用于检测式(2)所表征的抛物线,需要采样 5 个数据点才能确定抛物线参数,因此称之为基于 RHT 的 5 点抛物线检测法,记作 RHT-5。当目标所处的环境恶劣,导致雷达数据图中数据点较多时,RHT-5 会引入大量的无效采样,既增加了计算量和存储量,还会导致在可接受的时间和存储量的情况下,检测不到目标的抛物线轨迹。设雷达数据图中总的数据数为 N ,属于目标的数据数为 n ,那么,随机采样所得 5 点落在同一抛物线上的概率 $P_d - 5$ 为

$$P_d - 5 = \frac{C_n^5}{C_N^5} = \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3) \cdot (n-4)}{N \cdot (N-1) \cdot (N-2) \cdot (N-3) \cdot (N-4)} \approx \left(\frac{n}{N}\right)^5 \quad (3)$$

当雷达图像中数据点较多,而其中的目标数据点却比较少时,这个概率是很小的。为了提高抛物线的检测概率,减少运算时间,必须对式(2)的抛物线形式进行变形,降低参数空间的维数。本文采用坐标变换的方法将一般的抛物线变成开口始终朝上,对称轴平行于 Y 轴的标准抛物线,参数空间的维数也由五维降到了四维,更重要的是将参与 RHT 的参数维数从五维降到了三维,称为基于 RHT 的 3 点抛物线检测法,记为 RHT-3。跟 RHT-5 相比,RHT-3 中随机采样所得的点落在同一抛物线上的概率约为 $(n/N)^3$ 。其中所采用的坐标变换公式为

$$x = X \cos \theta - Y \sin \theta, \quad y = X \sin \theta + Y \cos \theta \quad (4)$$

其中 $\theta \in [-180, 180]$ 。利用式(4)以及标准抛物线的特征,可将式(2)变为

$$Y = p_1 X^2 + p_2 X + p_3 \quad (5)$$

其中

$$p_1 = -\frac{a \cos^2 \theta + 2h \sin \theta \cos \theta + b \sin^2 \theta}{2(f \cos \theta - g \sin \theta)} \quad (6)$$

$$p_2 = -\frac{g \cos \theta + f \sin \theta}{f \cos \theta - g \sin \theta} \quad (7)$$

$$p_3 = -\frac{c}{2(f \cos \theta - g \sin \theta)} \quad (8)$$

由式(5)可以看出,抛物线方程只有 3 个参数。

3 基于坐标变换与 RHT 的 3 点抛物线检测算法

基于坐标变换与 RHT 的 3 点抛物线检测算法的基本步骤如下:

步骤 1 对于 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 区间内的一个离散角度 θ_i ,

利用式(4),对原始的雷达数据图进行坐标变换,得到变换后的雷达数据图。

步骤 2 初始化基元参数的累加器数组。

步骤 3 从变换后的所有数据点中随机抽取一个最小点集(即, 3 个数据点),计算出由此最小点集决定的基元参数。

步骤 4 对基元参数的累加器数组进行计数。

步骤 5 当累加器数组中某个基元参数的计数值达到预定的阈值 $T(T \geq 2)$ 时,对由此计数值所对应的基元进行验证,判断图像中是否确实存在这样一个基元(即该基元是否含有足够多的数据点)。若是,则对基元参数进行校正,然后输出此基元,并清除图像中所有属于此基元的数据点。其后重新初始化累加器数组。

步骤 6 重复步骤 3 到步骤 5,直至满足某个终止条件(通常指循环次数达到预定值后仍无法找到任何新的基元)。

步骤 7 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 区间内的离散角度是否搜索完毕,如没有,重复步骤 2 到步骤 6,直到所有的角度都搜索完毕。

步骤 8 给所有检测到的抛物线设置一个基于回波功率(或幅度)的第二门限,从而得出最佳的抛物线及其变换角度。

步骤 9 利用逆坐标变换,将检测到的抛物线及其点迹变换到原始的坐标平面中。

在第 5 步中,本文还充分考虑了雷达目标的运动特性,利用目标的最大可能速度,删除某些被检测到的虚假的基元参数,从而减少了计算量和存储量,并降低了虚警概率。

4 仿真实验及结果分析

X - Y 平面中,目标在 K 分布杂波加热噪声背景下作匀加速机动。观测时间 20s,扫描次数 10 次;每次扫描的平均杂波点数为 10 个;信干比 2dB,杂噪比 1dB;测距误差 40m;目标初始状态 $[40550\text{m}, -500\text{m/s}, 4\text{g}, 35600\text{m}, -100\text{m/s}, 3\text{g}]$,其中 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。图 1 给出了原始的雷达数据图,图中包含的数据点数为 173 个。

X - Y 平面的原始数据经过第一门限处理后剩余数据点数为 127 个,然后在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 的变换角度范围内进行搜索,角度离散度为 1° 。对于每一次坐标变换后的数据图,随机采样 2000 次,每次取 3 个点。图 2 给出了 360° 角度搜索时每个离散角度上检测到的归一化的平均积累回波幅度,其中的归一化是指每个回波点的幅度对平均噪声幅度的归一化。最后在图 2 中设置第二门限,得到检测结果及其变换角度。图 3 给出的是此算法检测到的变换角度为 -49.5° 时的抛物线,图 4 中的黑点表示检测到的目标点迹。其中,圆圈代表仿真

的真实目标点迹。

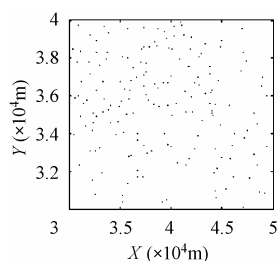


图 1 X-Y 平面中原始的
雷达数据图

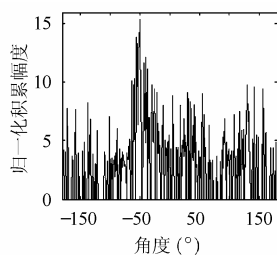


图 2 归一化的平均积累
回波幅度

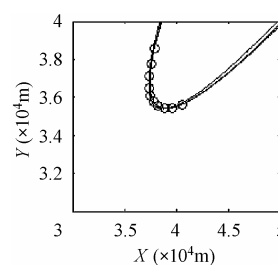


图 3 搜索到的抛物线

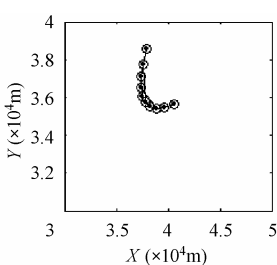


图 4 搜索到的点迹

从 RHT 处理的数据点数可以得出, 在处理步骤相似的情况下, 理论上, RHT-3 检测到目标点迹的概率是 RHT-5 的 363 倍, 不过在实际中, 由于目标点迹的坐标都带有测量误差, 所以 RHT-3 相对 RHT-5 的检测能力的提高将大于 363 倍。

另外, 在图 3 中可以看到, 该算法检测到 3 条抛物线, 产生这种情况的根本原因是为了保证较高的检测概率。另一方面, 由于雷达测量存在测量误差, 所以目标点迹不可能精确地位于一条抛物线上, 而是分散在几条相近的抛物线上, 这也是检测到多条抛物线的原因之一。

仿真过程中我们发现, 杂波(干扰)的密集程度, 信干比的大小以及采样次数对算法的检测性能有较大影响。针对不同的杂波环境和采样次数, 图 5 和图 6 分别给出了 500 次 Monte Carlo 仿真实验的结果。其中, 图 5 显示的是密集杂波环境下(每次扫描的平均杂波数取 10), 不同采样次数对应的检测概率与虚警概率; 图 6 显示的是稀疏杂波环境下(每次扫描的平均杂波数取 3), 不同采样次数对应的检测概率与虚警概率。从图 5, 图 6 可以看到, 在任一杂波环境下, 当门限不变时, 采样次数越少, 检测概率和虚警概率都较低; 采样次数越多, 检测概率与虚警概率都较高。从图 5 中还可以看出, 为了保证较高的检测概率, 其虚警概率是非常高的, 特别是当采样次数超过 2000 次时, 几乎肯定产生虚警。所以在密集杂波环境中, 该算法的性能需要进一步改善。与图 5 相比, 图 6 中稀疏杂波环境下的检测性能明显好于密集杂波环境下的检测性能。

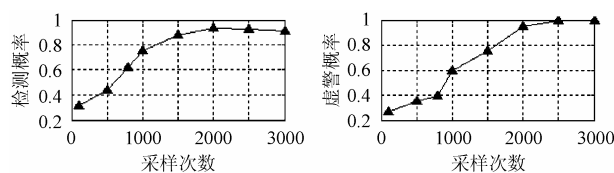


图 5 密集杂波环境下的检测性能

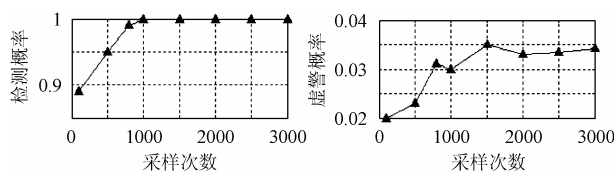


图 6 稀疏杂波条件下的检测性能

5 结束语

本文将坐标变换与 RHT 结合起来用于检测雷达坐标平面中具有抛物线轨迹的运动目标, 并在所检测到的目标点迹的基础上, 利用目标的速度上限消除虚假点迹。仿真表明新算法具有计算速度快, 漏警概率小等优点。同时分析了不同杂波环境与采样次数对算法检测性能的影响。下一步的工作将是进一步分析数据空间的第一门限, 变换角度的离散度, 采样次数, 以及第二门限等因素对算法检测性能的影响, 并进一步研究消除虚假航迹的方法, 以算法在改善密集杂波环境中的检测性能。

参考文献

- [1] Hough P V C. Method and means for recognizing complex patterns. U.S. Patent 3,069,654, Dec, 1962.
- [2] Carlson B D, Evans E D, Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform, part I: System concept. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 102 – 108.
- [3] Jafri M Z M, Deravi F. Efficient algorithm for the detection of parabolic curves. *Vision Geometry III*, 1994, SPIE Vol. 2356: 53 – 62.
- [4] Xu L, Oja E. Randomized Hough transform: basic mechanism, algorithms, and computational complexities. *CVGIP: Image Understanding*, 1993, 57(2): 131 – 154.
- [5] 陈燕新, 戚飞虎. 一种新的基于随机 Hough 变换的椭圆检测方法. *红外与毫米波学报*, 2000, 19(1): 43 – 47.

曲长文: 男, 1963 年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、电子对抗等。

黄 勇: 男, 1979 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号检测与处理。

苏 峰: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号检测与处理。

何 友: 男, 1956 年生, 教授, 主要研究领域有: 多传感器信息融合、多目标跟踪、模式识别、雷达自适应检测方法、分布检测理论及应用等。