

# 一种基于 Hough 变换的航迹起始新方法

汤金平<sup>1</sup>, 时银水<sup>1</sup>, 朱 岩<sup>1</sup>, 司鹏燕<sup>2</sup>

(1. 防空兵指挥学院, 郑州 450052; 2. 解放军 68306 部队, 临潼 710608)

**摘要:**针对 Hough 变换法计算量大、存储量大以及在参数空间量化间隔和积累方式难于选取的问题, 提出一种改进的 Hough 变换法, 避免了参数空间间隔的选取问题。密集杂波背景下多目标的航迹起始仿真实验表明, 该方法能大大改善航迹起始的正确性和反应时间, 有效改善局部峰值簇拥现象, 而且对杂波干扰具有更好的稳健性, 比较适合密集杂波下目标的航迹起始。

**关键词:** Hough 变换法; 航迹起始; 仿真

**中图分类号:** TN957. 51

**文献标识码:** A

**文章编号:** CN32-1413(2009)02-0087-05

## A New Track Initiation Method Based on Hough Transform

TANG Jin-ping<sup>1</sup>, SHI Yin-shui<sup>1</sup>, ZHU Yan<sup>1</sup>, SI Peng-yan<sup>2</sup>

(1. Air Defense Forces Command Academy, Zhengzhou 450052, China; 2. Unit 68306 of PLA, Lintong 710608, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the Hough transform method needs a lot of calculation and storage, and it is hard to select the quantization interval and accumulation mode in parameter space, this paper puts forward a modified Hough transform method, which can avoid the selecting problem of the parameter space interval. Track initiation simulation experiment of multi-target under the background of dense clutter shows that the method can improve the validity of track initiation and reduce the response time greatly, effectively improve the phenomenon of part peak gathering, and has better stability to the clutter jamming, is more suitable for target track initiation under the surroundings of intensive clutter.

**Key words:** Hough transform method; track initiation; simulation

## 0 引言

Hough 变换的基本思想是把解析曲线从图像空间映射到以参数为坐标的参数空间中, 根据参数空间的一些标识反过来确定曲线的参数值, 进而得出图像空间中各种边界的确定性描述。这样, Hough 变换就把图像空间中较为困难的全局检测问题转化为参数空间中相对容易解决的局部峰值检测问题, 它可以识别和检测图像空间的任意解析曲线。Hough 变换以其对局部缺损的不敏感、对随机噪声的稳健性以及适于并行处理、实时应用等优良特性, 备受图像处理、模式识别和计算机视觉领域学者的青睐。同时也正是由于它的上述特点, 使得基于 Hough 变换的航迹起始方法成为当前航迹起始

方法研究的热点。

航迹起始时, 目标一般距雷达站很远且无很大机动, 这时可将目标近似看为直线运动, 目标的运动模型可用匀速直线运动模型(CV)或匀加速直线运动模型(CA)表示。这时目标航迹起始就可以简化为杂波背景下的直线的识别和检测问题。

## 1 经典 Hough 变换法

Hough 变换法是通过式(1)将直角坐标系中的观测数据 $(x, y)$ 变换到参数空间中的坐标 $(\rho, \theta)$ 。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为观察数据 $(x, y)$ 到直角坐标系原点的距离;  $\theta$  为距离向量  $\rho$  与  $X$  轴的夹角,  $\theta \in [0, \pi]$ 。

对于一条直线上的所有点在转换到参数空间时将形成一族相交的正弦曲线,而参数空间中交于公共点的曲线对应的直角坐标系中的坐标点也一定在一条直线上,如图1、图2。

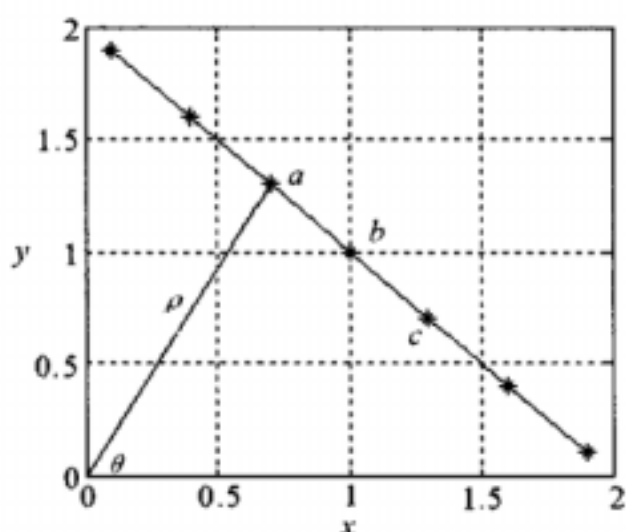


图1 直角坐标系中的一条直线

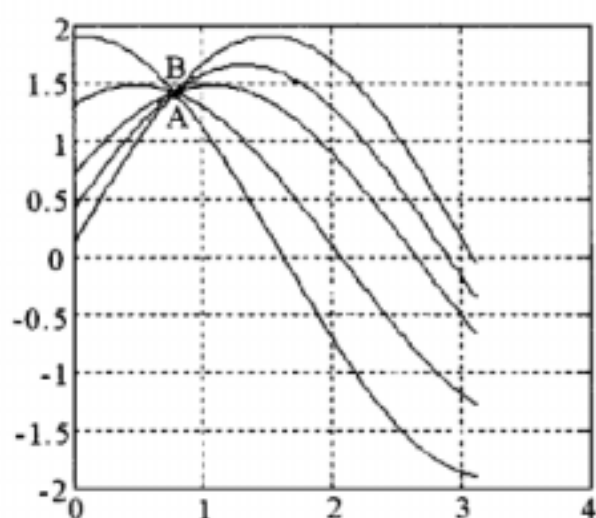


图2 Hough变换示意图

为了能在接收的雷达数据中将目标检测出来,需将  $\rho$ - $\theta$  平面离散地分成若干个小方块,通过检测3-D直方图中的峰值来判断公共的交点,如图3。

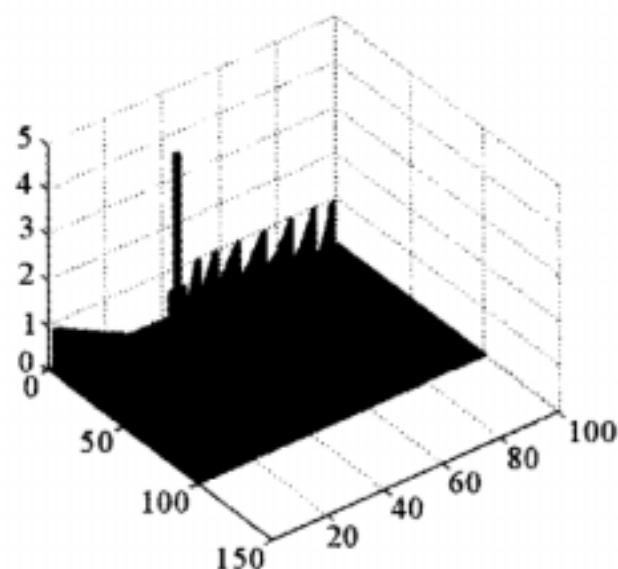


图3 参数空间中的直方图

直方图中每个方格的中心点为:

$$\begin{cases} \theta_n = (n-1/2)\Delta\theta, n=1,2,\dots,N_\theta \\ \rho_n = (n-1/2)\Delta\rho, n=1,2,\dots,N_\rho \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta\theta = \pi/N_\theta$ ,  $N_\theta$  为参数  $\theta$  的的分割段数;  $\Delta\rho =$

$L/N_\rho$ , 为参数  $\rho$  的分割段数;  $L$  为雷达测量距离的2倍。

当 X-Y 平面上存在有可能连成直线的若干点时,这些点就会聚集在  $\rho$ - $\theta$  平面相应的方格内。经过多次扫描之后,对于直线运动的目标,在某一个特定单元中的点数量会得到积累。直方图中的峰值暗示着可能的航迹,但有一些峰值不是由目标的航迹产生的,而是由杂波产生的。尽管 Hough 变换航迹起始法有以上这些优点,但其在工程实际的运用中仍存在许多问题,如:图像空间中的数据点通过 Hough 变换到参数空间中为一组正弦曲线,在进行判别矩阵的积累时需要在这组曲线上的每个点进行判别,计算量和存储量都相当大,此外参数空间量化间隔  $\Delta\theta$ 、 $\Delta\rho$  和积累方式的选取以及峰值提取的设定等问题将直接影响到密集杂波背景下目标航迹起始的性能。本文提出一种改进的 Hough 变换法,大大减小了其计算量,同时避免了参数空间间隔的选取问题,使其具有工程实用价值。

## 2 改进的 Hough 变换法

数据空间中的一点经 Hough 变换后映射为参数空间中的一条正弦曲线,而数据空间中的一条直线经 Hough 变换后映射为参数空间中的一点。将第  $i$  次扫描中的一个回波点  $a$  与第  $i+l$  次扫描中的一个回波点  $b$  相连,得到直线  $\overline{ab}$ ,经 Hough 变换后映射为参数空间中的一点  $A$ ;再将第  $i+l$  次扫描回波点  $b$  与第  $i+2$  次扫描回波中的  $c$  点相连,得到一条直线  $\overline{bc}$ ,经 Hough 变换后映射为参数空间中的一点  $B$ (如图1、图2所示)。如果点  $a$ 、 $b$ 、 $c$  在一条直线上,则参数空间中的  $A$  点和  $B$  点必然重合;如果点  $a$ 、 $b$ 、 $c$  近似在一条直线上,即直线  $\overline{ab}$  和  $\overline{bc}$  夹角接近  $180^\circ$ ,则参数空间中的  $A$  点和  $B$  点必然紧靠;否则,  $A$ 、 $B$  点远离。通过判断参数空间中点分布的密集程度可以检测出航迹。

将 Hough 变换用于航迹起始,对于边扫描边跟踪雷达而言,只对搜索回波数据进行处理。对于搜索回波数据,将不同周期的两点配对相连。由于每个扫描周期不可能都有某一目标的回波点,如果只将相邻2个周期的回波点进行配对相连,则当出现目标回波“闪烁”的情况,如每隔一个扫描周期丢失1个目标回波点  $[1\ 0\ 1\ 0\ 1]$  (1代表检测到目标回波,0代表未检测到目标回波),相邻2个周期回波将无法相连,会丢失3个周期的回波数据。为此将

积累周期内不同周期的两点配对相连。假设有 4 个积累周期,每个扫描周期得到的观测值个数均为  $n$ ,则 4 个积累周期内两点配对组合总数为:  $3n^2 + 2n^2 + n^2 = 6n^2$ 。然而并非空间中任何 2 个不同扫描周期的观测值都来源于同一目标,只有两点距离在一定范围内的才有可能来源于同一目标。设  $a(r_1, \theta_1), b(r_2, \theta_2)$  分别为  $t_1$  和  $t_2$  时刻的 2 个极坐标下的观测值,其中  $r_1, r_2$  为斜距,  $\theta_1, \theta_2$  为方位角,则二者之间的距离为:

$$r = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3)$$

只有满足  $v = \frac{r}{|t_1 - t_2|} \leq V_{\max}$ , 2 个观测值才有可能属于同一目标,其中  $V_{\max}$  为观测目标的最大速度。这一判断将大量减少搭配组合数目。对于满足上述判别条件的观测值  $a(r_1, \theta_1)$  和  $b(r_2, \theta_2)$ , 由式(3)将其坐标转换为直角坐标  $(x, y)$ , 两两相连, 由式(4)进行 Hough 变换:

$$\begin{cases} x = r\cos\theta \\ y = r\sin\theta \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \theta = -\tan^{-1} \frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} \\ \rho = \frac{-x_i y_{i+1} + x_{i+1} y_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为观察点到直角坐标系原点的距离;  $\theta$  为距离与  $X$  轴的夹角。

与常规 Hough 变换不同,将数据空间中的直线映射到参数空间中的一点。对于直线运动目标的观测点,其任意两点相连得到的直线映射到参数空间的  $(\rho, \theta)$  必定重合。由于存在目标机动和观测误差,来源于同一直线运动目标的每个  $(\rho, \theta)$  不可能完全重叠,它们将集中在某一小区域内,通过检测参数空间的密度可以找到这些小区域,从而得到相应的航迹。采用滑窗法检测集中分布的点。一般情况下,视积累周期数长短,  $\Delta\rho$  值为 30~60 km,  $\Delta\theta$  值为  $15^\circ \sim 20^\circ$ 。另外,为了避免来自同一目标的几个点分别落入相邻几个滑窗中,在进行滑窗检测时以  $\Delta\rho/2$  和  $\Delta\theta/2$  为移动单元,沿  $\rho$  和  $\theta$  轴方向移动,同时统计每个滑窗内的点数。参数空间中积累的点数  $N$  由获得的目标回波个数  $n$  决定,二者关系为:

$$N = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2} \quad (6)$$

随着积累周期数的增多,回波点数增加,参数空间中的积累效果将明显增强。在 3~5 个积累周期

时,选择合适的滑窗大小后,滑窗检测门限取 3 较为合理;在 6 个以上积累周期时,滑窗检测门限取 6 较为合理。

统计每个位置上滑窗内的点数,当某一滑窗内的点数超过门限时,该点集中的点对应的数据空间中的观测点相连即可起始一条航迹。

对于上面形成的航迹还要再进一步进行筛选,即速度滤波和航向验证。

在航迹起始时,往往仅根据一个目标最大速度设置相关区域大小。当杂波较少时,在相关区域内可以给到唯一的“点-点”相关解,但当杂波密集时,会生成虚假航迹,可以采用多道速度门限,以消除航迹的速度模糊,并把由不同速度通道输出的滤波结果反馈给航迹起始逻辑,用以自适应调整航迹起始参数。表 1 给出了一些典型目标的运动参数。

表 1 一些典型目标的运动参数

目标模型	舰船类 目标	军用飞机 类目标	直升机 类目标	民航类 目标	导弹类 目标
速度 (m/s)	0~20	50~ 1 000	0~80	50~300	200~ 2 000

门限设置如图 4 所示。其中  $(V_L, V_H)$  为速度置信度较高区间,  $(V_{\min}, V_L)$ 、 $(V_H, V_{\max})$  为速度模糊区,  $(V_{\max}, +\infty)$  为速度不可信区间,  $(0, V_{\min})$  为固定航迹区间。

设  $V$  为暂时航迹的速度,多区间速度滤波的决策逻辑为:

- (1) 当  $V_L < V < V_H$  时,速度置信度较高,接受目标,滤波器得到输出;
- (2) 当  $V_L < V < V_{\max}$  或  $V_{\min} < V < V_L$  时,速度模糊,暂不输出航迹,增加信息积累。
- (3) 当  $V > V_{\max}$  或  $V < V_{\min}$  时,不接受目标,暂时航迹删除。



图 4 多道速度门限

目标在飞行过程中航向应该是一个平稳缓变过程,也就是说,暂时航迹的航向均方误差应小于一给定门限。

设每个点到暂时航迹中第一个点的航向为  $C_i$ , 最后一个点到第一个点的航向为  $C$ , 则有:



$$C = \tan^{-1} \left( \frac{Y_n - Y_o}{X_n - X_o} \right) \quad (7)$$

式中:  $X_n, Y_n$  为暂时航迹的最终位置;  $X_o, Y_o$  为暂时航迹的初始位置。

$$\begin{cases} \bar{C}_i = \tan^{-1} \left( \frac{Y_i - Y_o}{X_i - X_o} \right) \\ \sigma_c^2 = \frac{1}{n-1} \sum (\bar{C}_i - \bar{C}) \end{cases} \quad (8)$$

决策逻辑为:  $\sigma_c^2 < K_c$  时, 暂时航迹输出;  $\sigma_c^2 \geq K_c$  时, 暂时航迹删除。其中  $K_c$  为航向误差门限, 其大小与测量误差有关, 测量精度越高,  $K_c$  越小; 反之  $K_c$  则越大。

改进的 Hough 法流程图如图 5 所示。

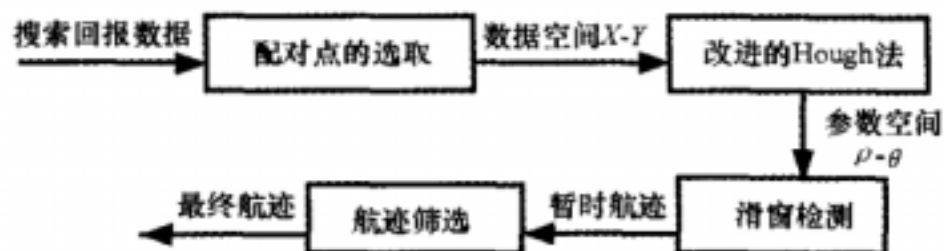


图 5 改进的 Hough 法

### 3 仿真实验

仿真环境为: 假设 5 个目标做匀速直线运动, 用一个 2D 雷达对目标进行跟踪, 5 个目标的初始位置为 (55 000 m, 55 000 m), (45 000 m, 45 000 m), (35 000 m, 35 000 m), (45 000 m, 25 000 m), (55 000 m, 15 000 m), 5 个目标的速度均为  $v_x = 500$  m/s,  $v_y = 0$  m/s。雷达的采样周期为  $T = 5$  s, 测向误差和测距误差分别为  $\sigma_\theta = 0.3^\circ$ ,  $\sigma_\rho = 40$  m。每个周期内的杂波个数由式(9)确定:

$$e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{J-1} \frac{\lambda^j}{j!} < r \leq \sum_{j=0}^J \frac{\lambda^j}{j!}, J = 1, 2, \dots \quad (9)$$

式中:  $r$  为 (0, 1) 区间上的均匀分别产生的随机数;  $J$  为产生的杂波个数。

取  $\lambda = 10$  时, 在连续 4 个周期内产生的杂波点与目标真实点的态势分布如图 6 所示, “\*、□、+、·” 分别代表第 1、2、3、4 二次扫描时的杂波点, “○” 代表目标的真实点。分别用传统的 Hough 法和改进的 Hough 变换法对上述环境下的目标进行航迹起始: 对于传统的 Hough 法,  $N_\theta = 90$ ,  $N_\rho = 90$ , 参数空间的门限为 4; 改进的 Hough 变换法中  $\Delta\rho = 30$  km,  $\Delta\theta = 15^\circ$ , 参数空间的门限为 3,  $V_L = 140$  m/s,  $V_H = 500$  m/s,  $V_{\min} = 50$  m/s,  $V_{\max} = 1\,000$ ,  $K_c = 0.8$ 。图 7 为传统的 Hough 法航迹起始的情况, 图 8 为改进的 Hough 变换法航迹起始的情况。

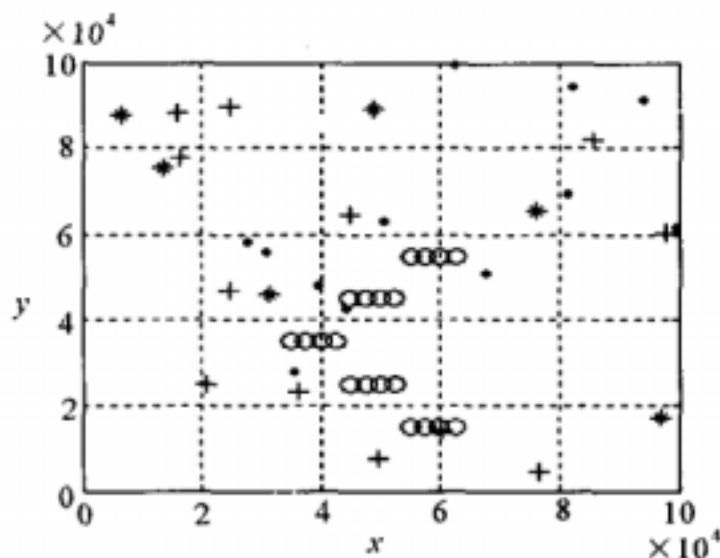


图 6 杂波点与真实点的态势图

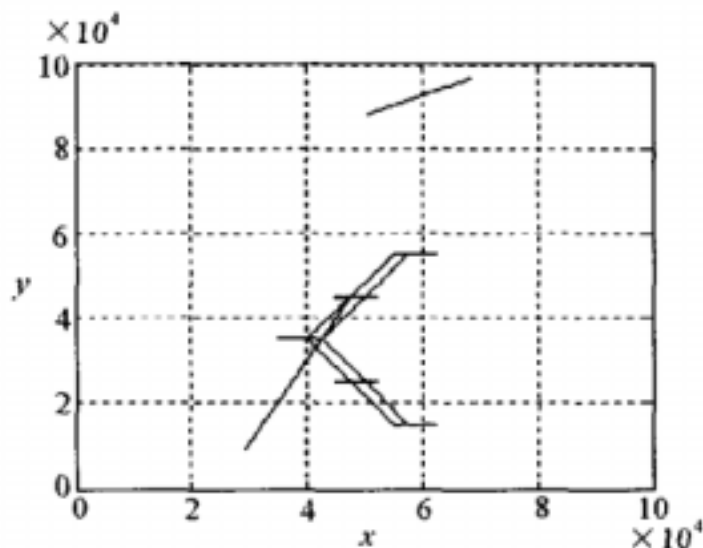


图 7 基于 Hough 变换的航迹起始

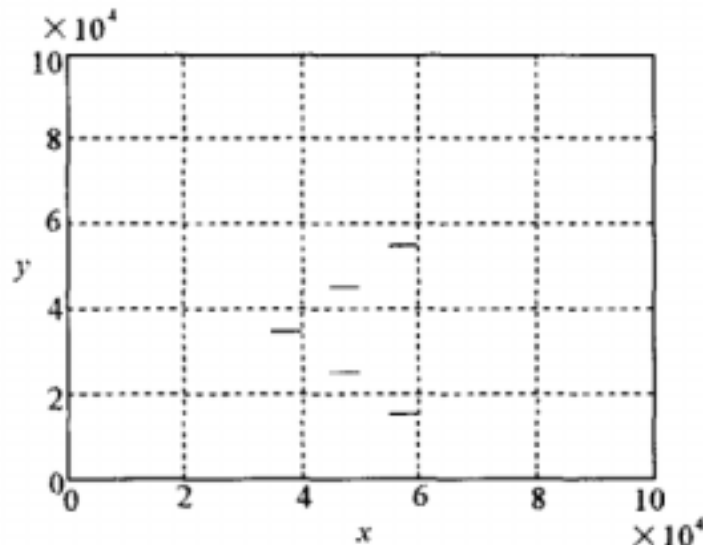


图 8 基于改进的 Hough 变换的航迹起始

取  $\lambda = 100$  时, 仿真条件同上, 此时得到的态势图如图 9, 基于传统的 Hough 法航迹起始如图 10, 基于改进的 Hough 变换航迹起始如图 11。

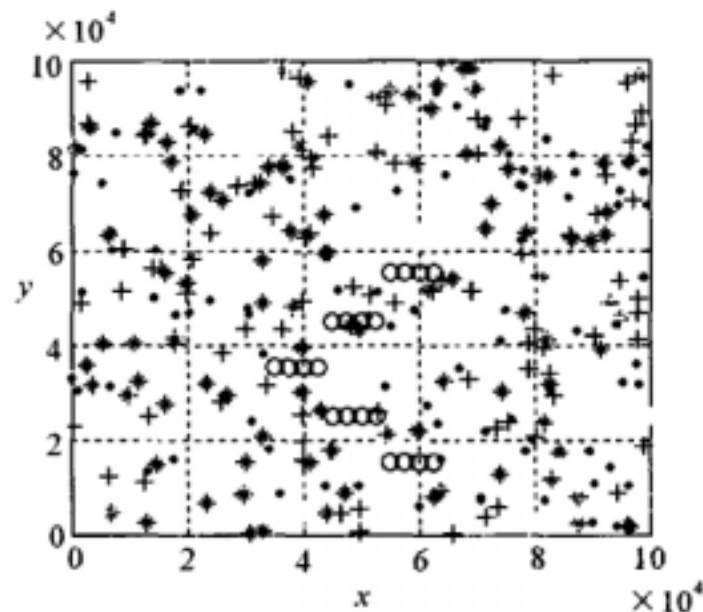


图 9 基于改进的 Hough 变换的航迹起始

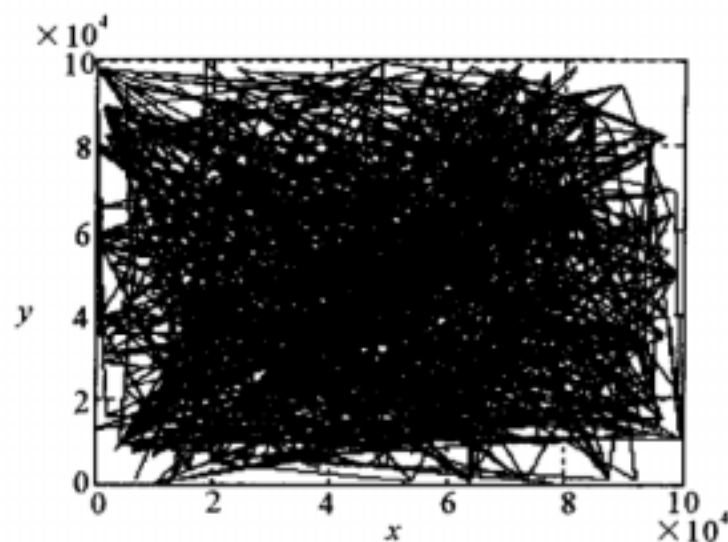


图 10 基于 Hough 变换的航迹起始

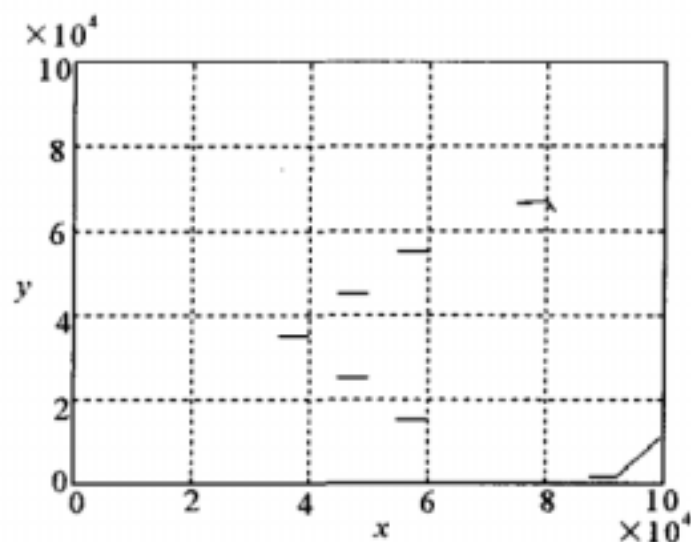


图 11 基于改进的 Hough 变换的航迹起始

表 2 为上述两种仿真情况下基于经典的 Hough 变换和基于改进的 Hough 变换的航迹起始性能指标比较。从表中可以看出基于改进的 Hough 变换在密集杂波背景下的航迹起始的存储

量和计算量都比经典的 Hough 变换小,而航迹起始的正确率要大大优于经典的 Hough 变换,对杂波干扰具有更好的稳健性。

表 2 航迹起始的性能指标比较

起始方法		存储量	计算量	航迹起始成功率
$\lambda=10$	经典的 Hough 变换	$8 \times 10^6$	$4.8 \times 10^7$	45.46%
	改进的 Hough 变换	$3.5 \times 10^3$	$2.1 \times 10^4$	100%
$\lambda=100$	经典的 Hough 变换	$8 \times 10^5$	$3.2 \times 10^8$	0.05%
	改进的 Hough 变换	$2.1 \times 10^3$	$8.4 \times 10^5$	55.56%

## 4 结论

仿真实验表明:改进的 Hough 变换法在密集杂波背景下的航迹起始的正确性和反应时间相对于传统 Hough 法都有较大提高,并且有效改善了局部峰值簇拥现象,对杂波干扰具有更好的稳健性,比较适合于密集杂波下目标的航迹起始。

## 参考文献

- [1] Iocchi L, Nardi D. Hough localization for mobile robots in polygonal environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40(1): 43 - 58.
- [2] 徐振来. 杂波背景下的目标跟踪技术[D]. 南京: 南京

电子技术研究所, 2004.

- [3] 程洪玮, 孙仲康. 利用 Hough 变换实现目标检测与航迹启动[J]. 国防科技大学学报, 1999(4): 15 - 18.
- [4] 王国宏, 苏峰, 毛士艺, 何友. 杂波环境下基于 Hough 变换和逻辑的快速航迹起始[J]. 系统仿真学报, 2002(7): 874 - 876.
- [5] 金术玲. Hough 变换关键问题研究及其在航迹起始方法中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [6] 何友, 修建娟, 张晶伟, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [7] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.

(上接第 70 页)

通过以上算例可以看出, 大气波导环境下, 雷达的探测距离与标准大气环境下相比明显增大, 波导现象可使雷达探测到数倍于雷达正常探测距离处的目标, 因而可实现超视距探测。

## 3 结论

大气波导现象使得雷达探测距离大为增加, 而根据文献[3]中的介绍, 我国有些地区是大气波导出

现的高概率地区, 因此利用大气波导环境实现雷达超视距在我国有着广泛的应用空间。

## 参考文献

- [1] Bean B R, Dutton E J. Radio Meteorology[M]. New York: Dover Publications, Inc., 1964.
- [2] 姚展予. 大气波导特征分析及其对电磁波传输的影响[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 605 - 615.
- [3] 刘成国. 蒸发波导环境特性和传播特性及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.