

# 低信噪比下基于收敛映射 Hough 变换的激光 目标检测算法研究

许立波<sup>1</sup>, 王杰<sup>2</sup>, 马鹏阁<sup>2</sup>, 张春风<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009; 2. 郑州航空工业管理学院, 郑州 450015)

**摘要:** 分析了经典 Hough 变换(HT)在参数空间映射方法存在无效映射及批处理投票缺乏实时性等问题,提出了依据空中目标速度约束条件选取样本进行收敛映射和在线投票的改进 HT 检测算法。仿真实验结果表明,改进目标航迹检测算法在信噪比(SNR)大于 0.8 dB 时都具有较好的效果,算法目标捕获时间因信噪比不同而不同。信噪比大时可以迅速捕获目标,信噪比低时则以时间换取检测概率。

**关键词:** 目标检测; 光电探测; Hough 变换; 收敛映射

**中图分类号:** V271.4; TN247

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2014)04-0038-05

## Laser Target Detection Algorithm Research Based on Converging Mapping Hough Transform in Low SNR

XU Li-bo<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>2</sup>, MA Peng-ge<sup>2</sup>, ZHANG Chun-feng<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment Institute, Luoyang 471009, China;

2. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** After analyzing the invalid mapping and the poor real-time performance in batching voting of the classical Hough Transform (HT) in parameter space mapping method, an improved HT detection algorithm was proposed on the basis of converging mapping of the aerial target velocity constraint sampling and online voting. The simulation results show that the improved target track detection algorithm achieves better performance while SNR is greater than 0.8 dB, and the target acquisition time varies with different SNR. The target can be captured quickly when SNR is high, and we can use time to exchange for the probability of detection when it is low.

**Key words:** target detection; photoelectric detection; Hough Transform; convergence of mapping

### 0 引言

激光目标检测通常对单帧激光回波信号滤波,当目标脉冲幅度高于检测门限后可确定目标的存在,其检测所需的最小可检测信噪比为 2~3 dB。由于激光在大气中传输,大气湍流的调制会导致发生“闪烁”效应,使得各帧回波的目标脉冲强度及信噪比起伏较大。随着信噪比的下降,目标闪烁现象更加严重,检测置信度将始终达不到判决阈值,导致无法检测出真实目标<sup>[1-3]</sup>。机载光电探测系统发射激光照射目标时,其

红外探测单元的光轴与激光光轴平行,两者同处于一个惯性平台上,能够持续稳定地对目标照射。短时间内,激光目标的运动轨迹可近似看作一条直线航迹。本文研究基于 HT 的检测前跟踪(Track Before Detect, TBD)方法,可将系统最小可检测信噪比进一步降低,从而增强对目标的作用距离。这对于弥补机载光电探测系统中激光与红外作用距离的差距、提高光电探测总体性能有着重要意义<sup>[4-6]</sup>。

### 1 基于 TBD 的激光弱目标检测问题分析

传统的目标先检测后跟踪(DBT)方法采用对单帧回波降噪处理,在提高信噪比后由门限检测出目标,再实施目标跟踪。TBD 方法对一段时间内每一帧的数据进行存储和处理,而并不对每帧数据提供检测。经过多帧积累,在目标的轨迹被估计出来后,检测结果与目标

收稿日期:2013-04-22

修回日期:2013-07-04

基金项目:洛阳电光设备研究所航空基金(2012ZC13002)

作者简介:许立波(1969—),男,辽宁抚顺人,硕士,高工,研究方向为光电对抗。

航迹可同时确认<sup>[7]</sup>,如图1~图2所示。



图1 基于 DBT 的目标检测与跟踪流程

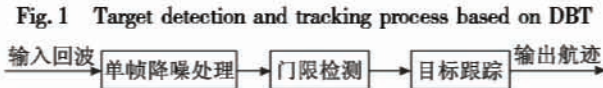


图2 基于 TBD 的目标检测与跟踪流程

Fig.2 Target detection and tracking process based on TBD

图3为以一定信噪比随机发生多帧回波数据组合成的距离像(三维坐标轴:竖直方向为信号幅度、水平轴为目标距离、向外的轴为时间轴)。可以看出,在大信噪比时,图像中能够明显观察到一条航迹;低信噪比时,尽管单帧中没有检测到目标,但从多帧数据总体观测的角度来看,目标(航迹)还是存在的<sup>[8-9]</sup>。

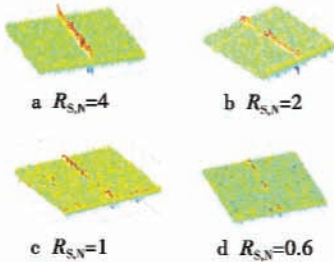


图3 低信噪比下多帧回波的组合图像

Fig.3 Combined image of multi-frame echo in low SNR

## 2 多帧目标回波距离像的预处理

### 2.1 预处理算法

脉冲激光雷达回波采样率高、数据量大。200 MHz 采样频率下,500 μs 单帧三脉冲回波采样有  $3 \times 10^5$  个样本点。按照 TBD 的思想,直接对原始多帧组合回波数据(raw data)进行 Hough 变换参数空间映射,运算量将非常大,不具可行性。因此,在进行航迹跟踪前,应结合激光目标回波信号的特征进行预处理,滤除图像中一定的噪声冗余点,降低参与目标航迹跟踪的样本数<sup>[10]</sup>。

### 2.2 距离像增强

低信噪比下目标回波脉冲已经被噪声淹没,采取数字滤波会影响数据的原始特点,另外也会带来较大的运算量。若采取小波降噪措施,运算量还将更大。因此,只采用三脉冲回波累加的措施,在保留数据原始性的同时获得 $\sqrt{3}$ 的信噪比增益。另外,这也将三脉冲回波数据转换为单脉冲回波数据,减少了2/3的数据点。

### 2.3 距离像二值化

激光组合回波中大量存在密集点噪声与杂波,不适合数字图像处理中常用的边缘检测。因此,采取阈值比较法处理,滤除掉幅值较低的噪声点。应用中,阈值依

当前噪声样本的均方根值的一定倍率设定。具体做法是:首先,选择2000点噪声样本,利用式(1)计算噪声均方根值。由计算的RMS值,结合ADC幅度转换精度,可得到对应电压值。设RMS为100 mV,针对TBD检测主要满足信噪比为0.5以上的要求,对应目标脉冲回波峰值幅度为50 mV以上。因此,可按0.8的倍率对回波中幅度低于40 mV的噪声点加以去除。

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i} \quad (1)$$

组合回波“灰度”图像的二值化的具体做法是将高于阈值的采样点二值化为幅值为1的点,否则将该位置的幅值置为0。经过这样的处理之后,多帧组合回波数据就由一幅“灰度”图像转换为“二值”黑白图像,便于进行参数空间映射。

### 2.4 像素聚类

采样率200 MHz,宽度20 ns的回波中目标脉冲最多可连续采得4个点,低信噪比下,目标回波脉冲宽度通常达到50~100 ns,大量的高频噪声采样得到的只有1~2个点。在激光回波的降噪措施中,通常只对回波信号的幅度变化加以处理,未利用目标回波脉冲宽度明显区别于高频点噪声宽度这个特征,从组合回波的二值化图像中也可观察到此明显特征。因此,采取像素点聚类的方法,在组合回波图像中只留下连续为1的两点以上的像素,将孤立的值为1(左右相邻多个点的值为0)的像素点剔除,这样,大量的单点噪声被滤除,进一步减少了参与参数空间映射的像素数。

图4仿真对比了一幅原始信噪比为0.8 dB的多帧回波图像进行阈值比较及二值化后的图像在聚类前后的对比。图4a的原始灰度图像共 $200 \times 40 = 8000$ 点,图4b经过阈值比较及二值化处理后得到的图像像素点数为263点,图4c显示经过剔除单点像素聚类处理后,像素点数变为63点。可以看出,经过预处理,激光回波组合图像中的大量噪声被去除。预处理大大降低了参与参数空间映射的像素点数,剩余的少量有效像素点可以经过Hough变换迅速确定直线航迹。

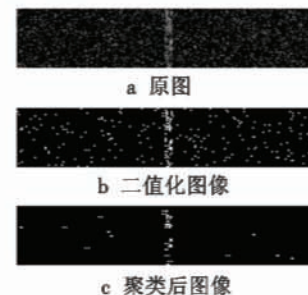


图4 目标回波距离图像预处理

Fig.4 Image preprocess of target echo distance

### 3 基于收敛映射的 HT 目标航迹跟踪算法

#### 3.1 经典 HT 算法

近年来,已有较多研究将 HT 用于密集噪声杂波环境下的目标航迹检测,HT 利用图像空间与参数空间的数据对偶性,将图像中的特征曲线映射为参数空间内的聚集点,通过在参数空间中搜索聚集点,实现对图像空间中曲线的检测<sup>[9-10]</sup>,图5给出了图像空间与参数空间的对偶映射关系。从图5中可以看出, $X$ - $Y$ 坐标系(图像空间)和 $K$ - $b$ 坐标系(参数空间)存在点一线的对偶性, $X$ - $Y$ 坐标系中的 $P_1$ 、 $P_2$ 两个点分别对应于 $K$ - $b$ 坐标系中的 $L_1$ 、 $L_2$ 两条直线, $k$ - $b$ 坐标系中这两条线的交点 $P_0$ 反过来对应 $X$ - $Y$ 坐标中的该两点所确定的直线 $L_0$ <sup>[11-12]</sup>。

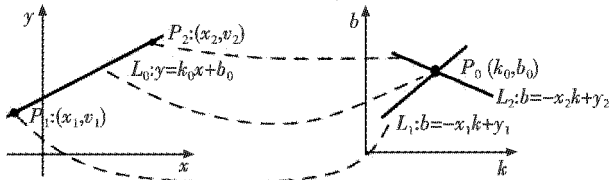


图5 图像空间到参数空间的映射

Fig. 5 Mapping of image space to parameter space

由于 $X$ - $Y$ 坐标中的垂直线的斜率 $K$ 值为无穷大,给计算带来不便,故通常使用点-正弦曲线对偶变换解决这一问题。直角坐标 $X$ - $Y$ 中的点 $(x, y)$ ,利用式(2),经过点-正弦曲线对偶变换在极坐标 $\theta$ - $\rho$ 中变为一条正弦曲线。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, 0 \leq \theta \leq \pi \quad (2)$$

HT 检测目标航迹的过程可以看成是映射和投票两个环节,映射将图像空间和参数空间联系在一起,投票则用于检测出参数空间的特征聚集点。这一参数空间映射检测的方法可用于密集杂波条件下的目标直线航迹检测。

#### 3.2 基于收敛映射的目标航迹检测

##### 3.2.1 基于运动状态的映射样本选取和在线投票

HT 可用于提取密集杂波环境下低可观测性目标的航迹,但存在诸如运算量大、无效映射、存储空间大、检测精度不高等缺点。图6a给出了经典 HT 的发散映射示意图,图像空间的每个点都分别对应于参数空间的一条曲线上的多个点,对应于 $k$ - $b$ 或者 $\rho$ - $\theta$ 平面的一条曲线路径上的多个小方格,图6b显示收敛映射将两个像素点 $d_1(x_1, y_1)$ 与 $d_2(x_2, y_2)$ 映射到参数空间的一个点,一次映射运算对应于 $k$ - $b$ 或者 $\rho$ - $\theta$ 平面的一个小方格。

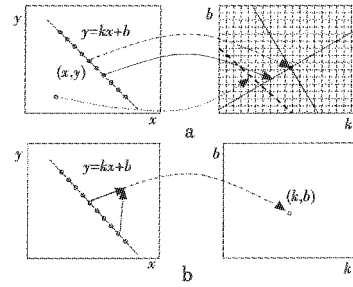


图6 收敛映射与发散映射的对比

Fig. 6 Comparison of convergence and divergence mapping

对于极坐标表示的参数空间,有映射关系为

$$\rho = x_i \sin \theta + y_i \cos \theta, i = 1, 2 \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} \quad (4)$$

给定两个点的坐标值,由式(3)、式(4)可得到

$$\rho = ((x_1 + x_2)/2) \sin \theta + ((y_1 + y_2)/2) \cos \theta \quad (5)$$

而避免计算 $\sin \theta$ 及 $\cos \theta$ ,式(5)可转换为式(6),即

$$\rho = \frac{0.5[(x_2 - x_1)(y_1 + y_2) - (y_2 - y_1)(x_2 + x_1)]}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (6)$$

对于反正切函数可采用切比雪夫多项式展开进行近似计算,算式为

$$\arctan x = 0.99913x - 0.32053x^3 + 0.14498x^5 - 0.0382x^7 \quad (7)$$

实际 DSP 应用中可采用查表法实现 $\rho, \theta$ 的计算,以提高计算速度。

对于图像中的 $N$ 个像素点,设 $\theta$ 步长为 $\pi/180$ , $\theta \in [0, \pi]$ ,经典 HT 的映射次数 $M_{\text{div}}$ 为

$$M_{\text{div}} = N \times 180 \quad (8)$$

从 $N$ 点中抽取两点进行收敛映射的总次数 $M_{\text{conv}}$ 为

$$M_{\text{conv}} = C_N^2 = \frac{N!}{(N-2)! \times 2} = \frac{N \times (N-1)}{2} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知,若参与映射的点数 $N \leq 360$ ,收敛映射次数少于 HT。激光回波图像由多帧组合而成,其中包含目标的运动信息,各次回波具有顺序的时间关系。对于回波图像中参与收敛映射的样本选取,不能随机选取,应结合目标运动状态进行选取。首先,目标运动航迹不可能出现在同一帧,因此不选择位于同一帧的两点进行映射,其次,两点选取应符合空中目标相对运动的速度限制。

HT 算法受到批处理方式的限制,其目标航迹捕获时间为了一幅图像处理时间的整数倍,改进算法每得到一幅数据就与之前的数据进行收敛映射,并在参数空间投票,达到阈值即宣布检测到目标。

##### 3.2.2 算法性能分析

###### 1) 目标航迹检测性能。



为了评价基于 HT 的目标检测性能,采用 10 帧回波缓存组成距离像(脉冲重复周期 100 ms),针对不同信噪比进行 20 次目标检测仿真实验。表 1 给出了目标航迹检测结果,可以看出,两种算法的目标航迹检测概率基本相同。

表 1 低信噪比下两种算法的目标检测性能对比

Table 1 Detection performance comparison of two algorithms in low SNR

SNR/dB	速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	HT 检测 概率	HT 捕获 时间/s	改进算法 检测概率	改进算法 捕获时间/s
0.8	600	16/20	2	16/20	0.9
0.8	150	17/20	2	17/20	0.9
0.8	0	20/20	1	20/20	0.7
0.7	600	15/20	2	15/20	1.6
0.7	150	16/20	2	15/20	1.5
0.7	0	16/20	2	16/20	1.2
0.6	150	11/20	5	11/20	2
0.6	0	16/20	3	16/20	1.6

目标捕获时间因信噪比的不同而不同,信噪比大时可迅速捕获目标,信噪比低时牺牲时间换取检测概率,这对于算法的实时应用有着重要意义。另外,低速目标的航迹跟踪性能相对较好。

2) 算法运算量与实时性分析。

对图像有  $L$  个像素点,  $\theta$  的步长为  $1^\circ$ ,基于 HT 的参数空间映射方法要求每个点都参与映射,总的映射次数为  $180L$ 。采用收敛映射的映射次数为  $L(L-1)/2$ ,由于  $L$  小于 360 点,则收敛映射次数少于 HT 的发散映射,而采取速度条件选通映射,还可进一步减少映射次数。由表 2 看出,几种信噪比下  $2000 \times 40$  的回波图像在预处理后像素总数均不足 360 点。可以看出,采取收敛映射和速度选通的改进参数空间映射的次数明显较 HT 低,并且,信噪比越高,运算量降低越明显,改进算法的运算量可以分布在各帧中进行,这将更加有利于算法的实时实现。

表 2  $2000 \times 40$  回波图像映射次数对比

Table 2  $2000 \times 40$  echo image mapping times

SNR/dB	像素点	发散映射	改进映射
1	189	34020	3028
0.8	232	41760	6860
0.6	318	57240	12721

3) 算法仿真实验。

仿真 1:单目标,相对载机速度 600 m/s,目标脉冲宽度为 50 ns,采样率 200 MHz,依  $R_{s,N} = 0.8$  dB 随机发生 50 帧 500 点激光回波信号进行组合。图 7 中目标相对载机的运动速度快,图 7b 预处理的效果理想,图 7c 为检测出的运动目标航迹,图 7d 的参数空间图像右上角可以看到一个明显的聚集点。

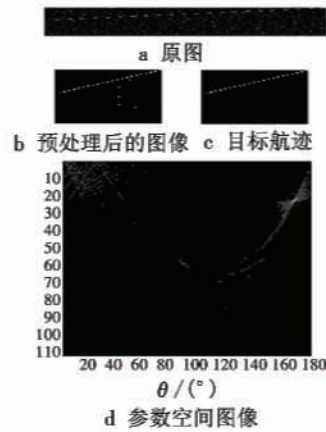


图 7 基于 HT 的激光目标航迹跟踪

Fig. 7 Laser target trajectory tracking based on HT

仿真 2:单目标,相对载机速度 600 m/s,目标脉冲宽度为 25 ns,采样率 200 MHz,依  $R_{s,N} = 0.7$  dB 随机发生 50 帧 1000 点激光回波信号进行组合。

图 8a 给出了组合回波距离像经二值化后的结果,图 8b 为基于 HT 的航迹跟踪结果,图 8c 为基于 CMRV-HT 的航迹跟踪,可以看出两种算法均正确检测出了目标航迹。图 8d 和图 8e 则给出了两种映射方法在参数空间的三维图,可以看出基于 CMRV-HT 的映射运算明显少于经典 HT。

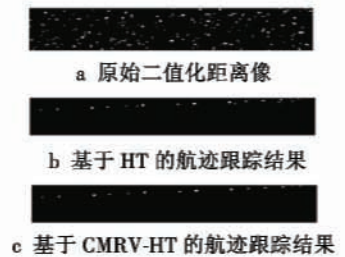


图 8a 原始二值化距离像

图 8b 基于 HT 的航迹跟踪结果

图 8c 基于 CMRV-HT 的航迹跟踪结果

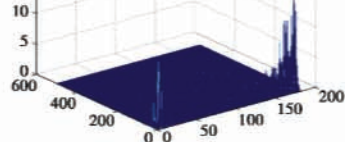


图 8d 基于 HT 的目标航迹参数空间三维图

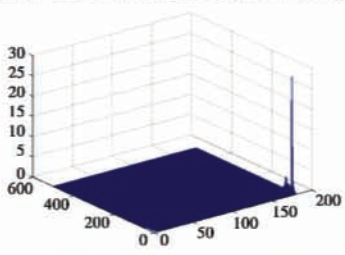


图 8e 基于 CMRV-HT 的目标航迹参数空间三维图

图 8 两种算法单目标检测的对比

Fig. 8 Performance of two algorithms in single target detection

## 4 结 论

本文首先讨论采用先跟踪后检测的 TBD 方法进行激光弱目标检测的可行性,之后,对多帧组合激光回波组成的距离像进行预处理,以降低输入航迹跟踪算法的数据量。接着,针对经典 HT 在参数空间映射方法存在无效映射及批处理投票缺乏实时性等问题,提出了依据空中目标速度约束条件选取样本进行收敛映射和在线投票的改进 HT 检测算法。收敛映射方法减少了参与参数空间映射的运算量,提高了算法的实时性。相比传统批处理方式的 HT 算法,改进算法可以实现在线实时投票。目标捕获时间可因信噪比不同而不同,信噪比大时可以迅速捕获目标,信噪比低时则以时间换取检测概率。仿真实验结果表明,改进目标航迹检测算法在信噪比大于等于 0.8 dB 时都具有较好的性能。

## 参 考 文 献

- [1] 孙立宏,王俊. 用于雷达弱小目标检测的改进 TBD 算法[J]. 雷达科学与技术,2007,5(4):292-295.  
SUN L H, WANG J. An improved track before detect algorithm for radar weak target detection[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(4):292-295.
- [2] VELEVA S, KACIC L. Estimating box-dimension by sign counting[C]//28th International Conference Information Technology Interfaces ITI 2006, Cavtat, Croatia, June 19-22, 2006:575-580.
- [3] 刘敬民,王浩,张洁. 先进战斗机光电综合系统发展综述[J]. 光电技术应用,2007(6):4-6,19.  
LIU J M, WANG H, ZHANG J. Development summary of integrated EO sensors systems in advanced fighters[J]. Electro-Optic Technology Application, 2007(6):4-6, 19.
- [4] XIA G F, ZHAO B J. Detection of air target based multi-fractal analysis in a laser radar[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1):51-53.
- [5] 平庆伟,夏桂芬,赵保军. 基于动态规划的激光雷达信号检测[J]. 激光与红外,2006,36(10):985-987.  
PING Q W, XIA G F, ZHAO B J. The signal detectron of laser radar based on dynamic programming[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10):985-987.
- [6] SU G, LIU Y Z, CHEN H. An adaptive channel prediction algorithm based on fractal brownian motion model[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 985:1-5.
- [7] BERTLING K, TUCKER J R, RAKIC A D. Optimum injection current waveform for a laser rangefinder based on the self-mixing effect[C]//Proceedings of SPIE, Int. Soc. Opt. Eng. 2003, 5277:334-345.
- [8] AGORIS P D, MEIJER S, GULSKI E, et al. Threshold selection for wavelet denoising of partial discharge data[C]//Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation Indianapolis, IN USA, 2004:62-65.
- [9] ZHANG L, BAO P. Denoising by spatial correlation thresholding[C]//IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(6):535-538.
- [10] YOON B J, VAIDYANATHAN P P. Wavelet-based denoising by customized thresholding[C]//Acoustics, Speech and signal Processing, 2004, doi:10.1109/ICASSP.2004.1326410.
- [11] CHEN Y, HAN C. Adaptive wavelet threshold for image denoising[J]. Image Processing, 2002, 9:1532-1546.
- [12] ZHAO Z D. Wavelet shrinkage denoising by generalized threshold function[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 18-21 August, 2005:5501-5550.
- (上接第 9 页)
- [11] 李纬,张兴华. 一种改进的基于 Pareto 解的多目标粒子群算法[J]. 计算机仿真,2010,27(5):96-99.  
LI W, ZHANG X H. An improved multi-objective particle swarm optimization algorithm based on Pareto[J]. Computer Simulation, 2010, 27(5):96-99.
- [12] 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. 农业机械学报, 2011,42(2):190-196.  
WANG Y, FENG Y X, TAN J R, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Society For Agriculture Machinery, 2011, 42(2):190-196.