文章编号:1001-5078(2023)11-1771-07

·图像与信号处理 ·

像素 binning 技术在高速弱点目标 探测中的应用研究

杨天远,凌 龙,鲁之君,周 峰,余恭敏,王 浩 (北京空间机电研究所,北京100094)

摘 要:弱点目标探测系统要求系统具备高的探测灵敏度和高空间分辨率,实现弱点目标的稳定探测、目标的精准定位以及多目标伴飞时的精细分辨。光电跟瞄系统一般分为目标捕获和 目标跟踪两个阶段。在目标捕获阶段,由于速度估计偏差,目标高速飞行的同时,若采用长积 分时间进行探测,易出现目标能量跨像元的现象,难以实现目标探测信噪比的提升。为了解决 目标高速运动导致的探测灵敏度降低的问题,本文提出了一种基于滑窗像素 binning 的高速弱 点目标探测跟踪技术。像素 binning 模式提高了初始捕获阶段的探测灵敏度和探测稳定性,当 跟瞄系统完成目标的稳定跟踪时,可以采用长积分时间和高分辨率模式完成目标的高灵敏度 和高分辨率探测。本文对像素 binning 模式的信噪比增强效果进行了分析。分析表明,像素 binning 模式有利于提高高速弱点目标探测的信噪比和探测稳定性。

关键词:像素 binning; 信噪比增强; 弱点目标探测; 自适应调节

中图分类号:TP391.41;TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.022

Application of pixel binning technology in fast weak target detection

YANG Tian-yuan, LING Long, LU Zhi-jun, ZHOU Feng, YU Gong-min, WANG Hao (Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 10094, China)

Abstract: The weak target detection system requires high detection sensitivity and high spatial resolution, so as to realize the stable detection of weak targets, accurate positioning of targets and fine resolution when accompanying multiple targets. Photoelectric tracking and aiming system is generally divided into two stages: target acquisition and target tracking. In the target acquisition stage, due to the deviation of velocity estimation, when the target flies at high speed, if a long integration time is used for detection, the phenomenon of target energy crossing pixels is prone to occur, and it is difficult to improve the signal-to-noise ratio of target detection. In order to solve the problem of low detection sensitivity caused by high-speed target movement, high-speed weak target detection and tracking technology based on sliding window pixel binning is proposed in this paper. Pixel binning mode improves the detection sensitivity and detection stability in the initial acquisition stage. After the tracking system completes the stable tracking of the target, long integration time and high-resolution mode can be used to complete the detection of the target with high sensitivity and high-resolution. In this paper, the SNR enhancement effect of pixel binning mode is analyzed. The analysis shows that

作者简介:杨天远(1990-)男,硕士,研究方向为红外系统技术。E-mail:yangtianyuan@163.com 收稿日期:2022-09-24

the pixel binning mode is conductive to improving the signal-to-noise ratio and detection stability of high-speed weak target detection.

Keywords: pixel-binning; SNR enhancement; weak target detection; adaptive adjustment

1 引 言

弱点目标探测系统需要具备高探测灵敏度。以天 文探测^[1-3]为例,一般弱点目标探测系统都通过长积 分时间保证对弱点目标的探测信噪比。对于多目标等 特定场景以及高精度定位需求,还需要探测系统具备 高的空间分辨能力^[4]。当目标与探测系统的相对运动 速度很快时,高的空间分辨率导致目标在探测器像元 内的驻留时间过短,不利于探测灵敏度的提升。

一般情况下,弱点目标探测时跟瞄系统都需要 经历对目标进行捕获和目标跟踪两个阶段。在捕获 阶段,需要在保证高探测灵敏度的同时需要保证高 的探测稳定性,从而避免目标丢失^[5-6],并对目标位 置、速度进行快速估计。当探测系统对目标进行随 动跟踪时,由于目标相对速度降低,可适当延长积分 时间,进一步提高目标探测的灵敏度,为目标的分辨 识别、高精度定位奠定基础。

针对高速弱点目标探测系统的捕获、跟踪和分 辨识别流程,本文设计出一种基于像素 binning 的高 速弱点目标探测模式。通过空域像素 binning 的方 式,提高目标捕获的信噪比和检测稳定性;通过多帧 关联估计目标运动速度并启动随动跟踪模式;当目 标和探测系统的相对运动速度小于门限时,进行积 分时间延长;当图像信噪比大于门限时,退出像素 binning 的方式进行高分辨率成像。此种工作模式 既能满足捕获阶段的高探测灵敏度和稳定性需求, 又能满足目标高分辨率成像和高精度定位需求。

2 滑窗像素 binning 模式简介

通过对探测器读出电路的定制设计,可以采用 单元输出或者滑窗像素 binning 输出。探测器的单 元输出方式和滑窗像素 binning 输出方式如图 1(a) 和图 1(b)所示。

滑窗像素 binning 模式下像元输出和单元模式 像元输出的对应关系为:

$$a(i,j) = \sum_{i_0=0}^{1} \sum_{j_0=0}^{1} A(i+i_0,j+j_0)$$
(1)

式中,A(*i*,*j*)为单元输出时的对应的输出结果;a(*i*, *j*)为像元合并后的输出结果。*i*,*j*分别为像素单元对 应的行号与列号;*i*₀,*j*₀分别为目标行号与列号的偏

移量。

本文设计的滑窗像素 binning 模式与传统像素 binning 模式有所区别。传统 binning 模式为典型的 下采样过程,每个像元只参与一次合并;本文的滑窗 像素 binning 方式为滑动窗口的下采样过程,每个像 元参与多次合并。这种 binning 方式相比于传统的 binning 方式点目标像斑的面积更大,合并后的目标 能量稳定性更好,更有利于目标的检出。



3 像素 binning 模式采样结果分析

3.1 基本概念与假设

1)目标能量分布

一般情况下,光学系统的光学传递函数可以用 高斯函数表示如下^[7-9]:

$$OTF(f) = \exp(-\frac{f^2}{\xi^2}) \tag{1}$$

式中,*f*表示空间频率;*ξ*为光学响应指数。相应的 目标能量分布可以由其完全确定,表达式为:

 $h(x,y) = A_0 \pi \cdot \xi^2 \exp(-(\pi\xi)^2 \cdot (x^2 + y^2))$ (2) 式中,(x,y)表示像面上一点的坐标; A_0 为目标能量 分布的幅值。

2) 光学系统的能量集中度

光学系统能量集中度定义为点扩散函数弥散斑 在一个像元中所包含的能量与总能量的比。对于像 元尺寸为 *d*₁×*d*₂ 的系统,能量集中度可以表示为:

$$\eta = \int_{-d_{2}/2}^{d_{2}/2} \int_{-d_{1}/2}^{d_{1}/2} \pi \cdot \xi^{2} \exp(-(\pi\xi)^{2} \cdot (x^{2} + y^{2})) dx dy$$
$$= erf(\frac{\pi\xi d_{1}}{2}) \cdot erf(\frac{\pi\xi d_{2}}{2})$$
(3)

可以看出,能量集中度为光学响应指数与像元 尺寸的函数。

3) 目标采样结果

点目标的采样结果与点目标的能量分布、目标 的相对运动函数、探测器的像元尺寸有关。点目标 采样结果^[10]:

 $S(m,n) = \delta(m,n) \cdot M(x,y) * h(x,y)$ (4) 式中,m、n为目标离散采样的采样位置;M(x,y)为 运动采样函数。采样运动函数为两个方向上采样运 动函数的乘积,以一维采样函数为例,当目标在采样 时间内的x方向运动距离 $L \leq d_1$ 时,运动函数的x方向分量表示如下:

$$M(x_0) = \frac{1}{d_1} \tag{5}$$

式中, x_0 为理想情况下函数的取值范围,实际情况 中积分时间小于采样时间,因此实际函数中 $x < x_0$ 。 当 $d_1 < L \le 2d_1$ 时,运动函数的x方向分量表示 如下^[11-13]:

$$M(x_0) = \begin{cases} \frac{x}{d_1} \frac{1}{L - d_1} & (0 \le x_0 \le L - d_1) \\ \\ \frac{1}{d_1} & (L - d_1 < x_0 \le d_1) & (6) \\ \\ \frac{L - x_0}{L - d_1} \frac{1}{d_1} & (d_1 < x_0 \le L) \end{cases}$$

当 $L > 2d_1$ 时,运动函数的x方向分量表示如下:

$$M(x_0) = \begin{cases} \frac{x_0}{d_1} \frac{1}{L - d_1} & (0 \le x_0 \le d_1) \\ \frac{1}{L - d_1} & (d_1 < x_0 \le L - d_1) & (7) \\ \frac{L - x_0}{L - d_1} \frac{1}{d_1} & (L - d_1 < x_0 \le L) \end{cases}$$

4) 探测能量集中度

探测能量集中度^[14-16]是指对点目标进行采样时,单个像元收集到的最大能量与积分时间内目标 辐射总能量之比。计算方法如下:

$$\eta_{d} = \frac{\max(I_{\text{sample}}(m,n))}{I_{\text{target}}}$$
(8)

式中,*I*_{sample} 为探测器像元采样后获得的目标能量, 可由 *S* 通过定标系数获得;*I*_{target} 为目标的总能量。

探测能量集中度与采样相位、积分时间内目标 相对运动速度等因素有关。探测能量集中度小于等 于光学系统能量集中度。

3.2 不同采样相位下目标采样结果分析

本文以光学系统能量集中度 0.50 进行仿真计 算,探测器两个方向上 d₁、d₂ 均等于 p₀m、n 按下式 取一系列离散值,并计算普通采样模式和滑窗像素 binning 采样模式下的探测能量集中度:

$$m = (m_0 + \frac{\omega}{5})p, m_0 = 1, 2, 3 \cdots, \omega = 1, 2, \cdots, 5$$
(9)

$$n = (n_0 + \frac{\xi}{5})p, n_0 = 1, 2, 3 \cdots, \xi = 1, 2, \cdots, 5$$
(10)

称 m/p、n/p 的小数部分为采样相位。图 2 表示当目标相对静止时,初始目标采样相位对采样结果的影响。图 3 和表 1 表示不同采样相位下的探测能量集中度统计结果。





(b) 像素binning模式下的采样结果



Fig.2 Target sampling results under different sampling modes 从统计结果可以看出,滑窗像素 binning 模式具 有探测能量集中度高而且稳定的特点,相比于普通 采样模式,采样相位对探测能量集中度的影响很小。



图 4 表示当目标初始采样相位相同时,不同积 分时间内的相对运动对采样结果的影响。图 5 和 表 2表示不同积分时间内的相对运动条件下的探测 能量集中度统计结果。

3.3 不同积分时间内相对运动目标采样结分析 从统计结果可以看出,滑窗像素 binning 模式具有

探测能量集中度高而且稳定的特点,相比于普通采样 模式,目标相对运动对探测能量集中度的影响很小。

表 1 不同采样相位下探测能量集中度统计结果 Tab. 1 Statistical results of degree of detection energyconcentration at different sampling phases











表2 不同积分时间内目标相对位移下 探测能量集中度统计结果

Tab. 2 Statistical results of degree of detection energy Concentration at different displacement

in integral time								
	探测能量	探测能量	探测能量					
	集中度最大值	集中度最小值	集中度最均值					
普通采样体制	0. 50	0.13	0.30					
像素 binning 体制	0. 93	0.43	0.72					
能量采集倍率	1.86	3.40	2.43					

4 像素 binning 模式信噪比增强效果分析

单次探测点目标图像的信噪比可表示为[17]:

$$SNR_d = \frac{S_T}{N} \eta_d \tag{11}$$

式中, S_{τ} 表示目标信号;N表示噪声; η_d 表示探测能量集中度。

理论上在模拟信号输出时即进行滑窗 binning 可实现更高的信噪比增强效果,但是实现难度较大。 本文对数字信号 binning 的方式对信噪比增强效果 进行分析,作为模拟信号输出时即进行滑窗 binning 效果的参考。

在积分时间内相对运动为 0.5 个像元时,随机 采样的探测序列如图 6 所示。连续 100 次采样得到 的仿真信噪比如图 7 所示。可以看出,相比于普通 采样模式,像素 binning 模式下目标亮度最大值、信 噪比很稳定,有利于目标的稳定探测。





图 8 表示采用蒙特卡洛法对像素 binning 模式和 普通采样模式下信噪比之比的最大值、最小值和均值 随积分时间内目标相对位移的变化结果。可以看出, 在目标速度越快时,像素 binning 体制的优势越明显。 表 5 不同采样体制下目标信噪比统计结果

Tab. 5 Statistical results of SNR in normal mode

and oversampling binning mode

相对运动速度	0		0.5 像元			
采样相位	最好	最差	平均	最好	最差	平均
普通采样体制信噪比	20.72	10.09	16.25	12.44	6.05	9.75
像素 binning 体制信噪比	22.96	18.14	21.30	14.83	11.72	13.76





5 结 语

本文对滑动窗口像素 binning 模式的信噪比增 强效果进行了分析,表明滑动窗口像素 binning 模式 对目标采样相位造成的能量分散影响、目标高度运 动对采样集中的影响有显著改善,有利于提高高速 弱点目标探测的信噪比和探测稳定性。利用目标高 速运动时滑动像素 binning 的高信噪比、高稳定性优 势,在对高速弱点目标进行探测时,可在捕获阶段采 用像素 binning 模式,当图像信噪比达到门限时切换 成普通采样模式进行高分辨探测;同时,跟瞄系统利 用实时速度估计结果对目标进行跟踪,当目标相对 运动速度达到相对速度门限时进行积分时间调档。 通过时域和空域的自适应采样切换,可以满足高速 弱点目标的高灵敏度、高分辨率探测需求。

参考文献:

- Fabinsky B, Brissenden R J, Silva D R, et al. The WISE in-orbit calibration [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2008, 7016:70161N.
- Burdick, Shawn V. SPIRIT III calibration stars: inband irradiance and uncertainty [J]. Optical Engineering, 1997, 36(11):2971-2976.
- [3] O'Neil R R, Gardiner H A B, Gibson J J. MSX: Remotely sensed observations of atmospheric infrared radiance and spatial structure [C]//International Symposium on Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2002:446 - 453.
- [4] Long Liang, Wang Shitao, Zhou Feng, et al. In-orbit radiometric calibration methods for remote sensing system to

detect space infrared point target[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2012,33(2):73-81.(in Chinese) 龙亮,王世涛,周峰,等.空间红外点目标遥感探测系 统在轨辐射定标[J]. 航天返回与遥感,2012,33(2):73-81.

- [5] Yang Tianyuan, Zhou Feng, Xing Mailing, et al. Design of point target sampling system of space scanning camera
 [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37
 (2):82-91. (in Chinese)
 杨天远,周峰, 行麦玲,等. 空间扫描相机点目标采样系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(2):82-91.
- [6] Yang Tianyuan, Zhou Feng, Wang Huaiyi, et al. Sampling model and derection method of point target based on bidirectional over-sampling system [J]. Laser & Infrared, 2016,46(11):1424 1430. (in Chinese)
 杨天远,周峰,王怀义,等.双向过采样系统点目标采 样模型与检出方法[J].激光与红外,2016,46(11): 1424 1430.
- [7] Casey E J, Kafesjian S L. Infrared sensor modeling for improved system design [C]//Inaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VII. Orlando, FL. US: International Society for Optics and Photonics, 1996.
- [8] Blackman S, Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems [M]. Boston, MA: Artech House, 1999: 99-100.
- [9] Yang Tianyuan, Yu Gongmin, Yang, Xiaole, et al. Method for crosstalk image restoration of linear array detector based on RC model [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (23):2304001. (in Chinese)
 杨天远,余恭敏,杨小乐,等. 基于 RC 模型的线阵探测 器串 扰 图 像 复 原 方 法 [J]. 光 学 提, 2020, 40 (23):2304001.
- [10] Sun J, Xiong X, Li Y, et al. Evaluation of radiometric improvements with electronic crosstalk correction for Terra MODIS band 27 [J]. IEEE Transactions on Geoence and Remote Sensing, 2014, 52 (10):6497-6507.
- [11] Dong Yucui, Chen Fansheng, Su Xiaofeng, et al. Temporal-spatial oversampling system and its performance analysis in point target detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9):2498 2507. (in Chinese) 董玉翠,陈凡胜,苏晓峰,等.时空过采样系统在点目标检测中的性能仿真[J].光学精密工程, 2014, 22(9):2498 2507.
- [12] Li Zhiguo, Shun Xin, Zhu Shusheng, et al. Target tracking algorithm based on certainty measurement of the feature [J].

Laser & Infrared,2015,45(5):576-579.(in Chinese) 李志国,顾鑫,祝树生,等.基于特征确定性的目标跟踪 算法[J].激光与红外,2015,45(5):576-579.

- [13] Wang Shitao, Zhang Wei, Jin Lihua, et al. Point target detection based on temporal-spatial over-sampling system
 [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013,
 (1):68-72. (in Chinese)
 王世涛,张伟,金丽花,等. 基于时 空过采样系统的
 点目标检测性能分析[J]. 红外与毫米波学报,2013,
 (1):68-72.
- [14] Li Wei, Li Hui. Infrared target tracking based on multiple features fusion and weight selected particle filter[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1):35-40. (in Chinese) 李蔚,李辉. 多特征融合的优化粒子滤波红外目标跟踪[J].激光与红外,2014,44(1):35-40.
- [15] Yang Tianyuan, Zhou Feng, Xing Mailing. A method for calculating the energy concentration degree of point target

detection system [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2017,38(2):41-48. (in Chinese) 杨天远,周峰,行麦玲. 一种点目标探测系统能量集中度 计算方法[J]. 航天返回与遥感,2017,38(2):41-48.

- [16] Zhu Xiangling, Wu Qinzhang, Chen Hong. Fusion algorithm of dual waveband infrared images based on wavelet transformation[J]. Laser & Infrared, 2014,44(5):572 576. (in Chinese)
 朱祥玲,吴钦章,陈洪. 基于小波变换的双波段红外图 像融合方法[J]. 激光与红外,2014,44(5):572 576.
- [17] Li Ping, Wei Zhonghui, He Xin, et al. Object recognition based on shape feature fusion under multi-views [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22 (12): 3368 – 3376. (in Chinese)

李平,魏仲慧,何昕,等.采用多形状特征融合的多视 点目标识别[J].光学精密工程,2014,22(12): 3368-3376.