

基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测

邓昊, 郑伟, 李明涛, 孙海彬, 王建峰, 周炳红

引用本文:

邓昊, 郑伟, 李明涛, 等. 基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2517–2526.

DENG Hao, ZHENG Wei, LI Ming-tao, et al. Dim moving target detection based on fluctuation analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2517–2526.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2517>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用视觉特征整合的红外弱小目标检测

Detection of infrared dim small target based on visual feature integration

光学精密工程. 2020, 28(2): 497–506 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202802.0497>

基于改进多尺度分形特征的红外图像弱小目标检测

Infrared dim–small target detection based on an improved multiscale fractal feature

光学精密工程. 2020, 28(6): 1375–1386 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202806.1375>

采用轮廓特征匹配的红外–可见光视频自动配准

Infrared–visible video automatic registration with contour feature matching

光学精密工程. 2020, 28(5): 1140–1151 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1140>

动基座下的运动目标检测

Moving target detection under moving base

光学精密工程. 2016, 24(7): 1782–1788 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162407.1782>

近地小行星基本物理性质的测光研究

Photometry studies of physical properties for Near–Earth asteroids

光学精密工程. 2020, 28(11): 2549–2562 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2549>

文章编号 1004-924X(2020)11-2517-10

基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测

邓昊^{1,2}, 郑伟^{1*}, 李明涛¹, 孙海彬³, 王建峰⁴, 周炳红¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 上海技术物理研究所 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;

4. 中国科学院 光学天文重点实验室, 北京 100101)

摘要:针对近地小天体监测和预警中极低信噪比运动目标难以检测的问题,提出了基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测方法,阐述了在时间区间上基于光场涨落分析的关联特征提取方法的原理。强背景信号的涨落在时间维度上具有稳定分布和稳定变化的特点,利用由目标运动导致的瞬态涨落在时间维度上分布的异常变化反演出暗弱运动目标的存在。首先将目标检测问题建模为基于单个像元灰度时序序列的一维信号检测问题,然后在时域上划分时间窗口,采用基于涨落分析的方法来提取关联特征,最后由关联特征的变化来检测目标信号。将该关联检测方法应用到一维时序信号仿真实验、暗弱运动目标仿真实验和近地小行星检测实验中,结果表明本文所提出方法的检测率和虚警率都显著优于其它几种经典常用方法,在仿真数据和真实数据中都有很好的检测效果。

关键词:图像序列;涨落分析;高帧频;暗弱运动目标;近地小行星

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202811.2517

Dim moving target detection based on fluctuation analysis

DENG Hao^{1,2}, ZHENG Wei^{1*}, LI Ming-tao^{1,2},SUN Hai-bin³, WANG Jian-feng⁴, ZHOU Bing-hong¹(1. *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*3. *Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*4. *Key Laboratory of Optical Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*** Corresponding author, E-mail: zhengwei@nssc.ac.cn*

Abstract: To detect moving targets with very low SNRs for monitoring small objects near the ground and providing early warnings regarding such objects, a dim moving target detection method based on fluctuation analysis was proposed. Furthermore, the principle of a correlation feature extraction method based on the fluctuation analysis of a light field in a time interval was expounded. Strong background signals were distributed and changed steadily in the time dimension. Transient fluctuation

收稿日期: 2020-05-07; **修订日期:** 2020-06-19.

基金项目: 北京市重大科技专项课题资助项目(No. Z181100002918004); 中国科学院智能红外感知重点实验室开放课题(No. CAS-IIRP-2020-04), 某重点实验室基金资助项目(No. 6142503190303)

in the time dimension, caused by the movement of a target, reflected the existence of a weak moving target. First, a one-dimensional signal model based on single pixel gray-scale time series was established. Then, the time window was divided in the time domain, and fluctuation analysis was used to extract related features. Finally, the target signal was detected based on changes in the correlation feature. The method was applied to one-dimensional time-series signal simulation, dim moving target simulation, and a near-Earth asteroid detection experiment. The experimental results show that the detection rate and false alarm rate of the proposed method are significantly better than those of several other commonly used methods. This method provides good detection using simulated and real data.

Key words: image sequence; fluctuation analysis; high frame rate; dim moving target; near earth asteroids

1 引言

近地小天体本身不发光,是典型的极暗弱运动目标。近地小天体监测预警存在视场、距离和分辨率的矛盾,根本原因是大视场、远距离和运动条件下的目标信号能量极微弱和信噪比极低。近地小天体的监测预警主要分为地基监测和天基监测两种方式。地基监测主要包括地基雷达监测和光学监测,地基雷达能实现全天时全天候监测,但在探测远距离的小型目标时,则会受到雷达功率和工作波长的限制;光学监测利用收集空间物体反射的光谱进行目标监测,具有较大的作用距离,目前的地面光学望远镜正向着更大口径、更大视场和更快反应的方向发展。天基监测可分为遥感监测和直接监测,遥感监测的设备包括光学望远镜、微波雷达以及激光雷达等,直接监测是通过天基碰撞监测仪器记录到的空间碎片碰撞现象,进而推算空间碎片的信息,当下的天基监测技术在近地小天体观测中起到了很好的补充作用,但还无法形成天基监测网络。

传统的基于成像的目标检测方法对探测信噪比要求高,需要进行时间或空间上的扫描对目标信号进行多次曝光,在抑制噪声的同时累积目标能量。这种方法采集完整数据消耗时间长,不适用于小、暗、弱运动目标和信噪比较低目标的探测和识别;其次,传统方法未考虑到低占比暗弱运动目标自身的粒子特征和背景的交互特性,平均噪声的同时容易损失掉目标本身就微弱的信号;第三,目标信号过于微弱,传统提升积分时间的同时难以抑制噪声同步累积,造成有效信号被噪声甚至背景波动

所淹没。在小行星探测中,盲搜索条纹检测是比较常用的方法,包括合成跟踪^[1]、近似离散拉东变换(Approximate Discrete Radon Transform, ADRT)^[2]以及近年提出的三维离散拉东变换(Three-Dimensional Discrete Radon Transform, 3DRT)^[3]等方法。

对于极低信噪比暗弱运动目标,难以累积有效积分时间而造成图像质量较差,导致难以对极暗弱运动目标进行检测和识别^[4]。因此,极低信噪比信号检测对于极暗弱运动目标探测具有重要意义和巨大的应用价值。

现有的运动目标检测的方法主要可以分为四类:基于空间滤波、基于时域滤波、基于时空联合^[5]和基于机器学习的方法。基于空域的检测方法主要通过抑制背景来检测目标,常用的基于空域的背景抑制算法有局部均值法^[6]、最大值滤波^[7]、形态学滤波(Top-Hat)^[8]和小波变换^[9]等算法,对目标信噪比要求较高。基于时域滤波方法是利用目标信号的时域信息来分割目标和背景,常用的检测方法有背景建模^[10]、帧间差分^[11]等方法,背景建模法对背景变化十分敏感,帧间差分法则易受到目标的运动速度以及噪声影响。针对基于时域和基于空域的检测方法无法同时利用目标的时域和空域信息,一些基于时空域联合的滤波方法被应用和提出,如光流法^[12]、三维匹配滤波^[13]、检测前跟踪(Track-Before-Detect, TBD)^[14]以及跟踪前检测(detect-before-track, DBT)^[15]等方法,光流法能独立检测运动目标,但非常耗时,三维匹配滤波难以检测信噪比较低的目标,TBD方法计算相对复杂、不易硬件实现;DBT方法抗干扰能力很差。基于机器学习的方法

法则是利用分类来进行运动目标的检测,常用模型包括基于传统的统计机器学习方法,如支持向量机^[16]、随机森林^[17]等,另外则是基于深度网络的有监督学习方法,如卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)^[18],YOLO^[19]等,对于极暗弱目标,深度网络模型很难构建外观模型,导致其鲁棒性不高。

以上方法均难以对近地小天体的监测和预警中极暗弱运动目标进行检测,因此本文提出一种基于涨落分析的关联检测方法,关联检测的核心思想是利用目标和背景在时间分布上的序贯差异性。序贯差异性是由于目标运动扰动了短时平稳的背景与噪声,从而导致背景噪声在不同时段的分布特性发生变化。利用高帧频采样能够获取时域分布特性,而关联度量方法能够将这种微弱的时序分布变化提取出来,从而反演出运动目标的存在。首先开展背景信号涨落分析,建立运动目标时序信号模型,利用一维时序信号仿真验证关联特征的有效性,用真实采集的无运动目标图像序列和仿真得到的运动目标模型得到半物理仿真数据,利用半物理仿真数据将关联检测方法和其他常用方法做对比分析,最后利用真实数据对关联检测方法的泛化能力进行检验并与其他方法比较分析。

2 方法和理论

2.1 机理与方法

由于光与物质之间的相互作用是随机进行的,在光的测量中都会伴随一定程度的涨落,使得在测量中都会存在随机性。对于暗弱运动目标,其自身能量和信噪比极低,此时的目标图像会极大地区别于传统的灰度图像,信号分布也与传统极大不同。极低信噪比暗弱目标信号表现离散性,幅度上类似于脉冲信号,时域上满足概率分布的随机性特征^[20],此时对暗弱目标信号的检测方法也将不同于传统的基于时域连续的方法,需要就其离散性和概率性分布来针对性考虑,本文从光场的涨落统计分布规律探讨对暗弱运动目标的检测是一有效的方法。

对于暗弱运动目标,目标信号的能量极低,此时,光子服从统计分布,利用分析光子的统计分布特征来研究暗弱目标光场在时间和空间上的分

布。在暗弱运动目标图像中,背景的暗噪声以及探测器的暗计数会在图像中造成随机噪声点,目标信号会因此湮没在噪声中,难以对其进行区分。此时背景噪声和运动目标的信号都很弱,两者均近似于服从泊松分布。此时采用统计检验的方法来处理目标时序信号,目的是抑制噪声和背景干扰,以提高暗弱运动目标的时域信噪比。

强背景信号的涨落在时间维度上稳定分布和稳定变化,运动目标的一个周期也符合涨落的理念,当目标穿越像元中分布稳定的背景和噪声时,由目标运动导致的瞬态涨落也混叠在整个光场的涨落之中,导致背景和噪声的分布发生变化,因此可以从涨落变化中反演运动目标的信息。在这里,光子涨落的大小利用偏差的均方根来表示^[21]:

$$\Delta n = \left[\sum_n (x_n - \bar{x})^2 P_n \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

其中: x_n 表示在一个特定模 x 内某单一时刻的光子数, \bar{x} 为其均值, P_n 表示 x 的条件下 x_n 出现的概率。自然光属于热辐射光,对于暗弱运动目标探测而言,对应的光场在时间维度上有很大的波动,这种不稳定性和光子的到达时间密切相关,因而不属于独立发生的事件。对于热辐射光,其积分光强的概率分布函数如下:

$$P_n = \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{x_n}{x}\right), \quad (2)$$

$$P(\omega) = \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{\omega}{\omega}\right), \quad (3)$$

其中: ω 表示光强, $\bar{x} = \eta\bar{\omega}$, η 为光子探测系统的量子效率。在每一个像元内,将时间轴分成大小相同的离散的时间区间,则相邻时间区间内的涨落 $\Delta(x - x_\tau)$ 可以定义为:

$$\Delta(x - x_\tau) = \left[\sum_n (d(x - x_\tau))^2 P_{(x-x_\tau)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

其中: $d(x - x_\tau)$ 表示对于有序离散分量长度为 N 的 x 和 x_τ 的距离计算,考虑到时间窗口 x 和 x_τ 在这里表现为一个向量。则整个考察区间内两个向量的距离涨落表示为:

$$d(x_n - x_m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(x_n - x_m). \quad (5)$$

同理,整个考察区间内两个向量的概率涨落,并进行泊松变换,则有:

$$P_{(x_n - x_m)} = \sum_{i=1}^k \frac{(\eta\bar{\omega})^n}{n!} \exp(-\eta\bar{\omega}) = \frac{\eta}{n!} \sum_{i=1}^k ((x_n - x_m))^n \exp(-\eta(x_n - x_m)), \quad (6)$$

进一步,考察整个区间内的平均涨落 $\Delta(x_n - x_{m_i})$:

$$\Delta(x_n - x_{m_i}) =$$

$$\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n - x_{m_i})^n \frac{\eta}{n!} \sum_{i=1}^n (x_n - x_{m_i})^n \exp(-\eta(x_n - x_{m_i})) \right] =$$

$$\frac{\eta}{Nn!} \sum_{i=1}^N (x_n - x_{m_i})^n \sum_{i=1}^n (x_n - x_{m_i})^n \exp(-\eta(x_n - x_{m_i})) =$$

$$\frac{\eta}{Nn!} \sum_{i=1}^N (x_n - x_{m_i})^n \exp(-\eta(x_n - x_{m_i})). \quad (7)$$

通过相邻时间区间内的涨落变化提取关联特征,再通过阈值分割找出关联特征变化异常的位置,进而反演出运动目标的存在。

2.2 方法步骤

由于暗弱运动目标的能量极低,会被背景或噪声湮没,此时若提取整个时域上的全局特征则无法反映出暗弱运动目标的存在,因此在时域上通过划分时间窗口的方式来提取局部特征,即在涨落分析中时间区间上的涨落 $\Delta(x_n - x_{m_i})$ 反映为

两个区间的关联特征。对于背景和噪声而言,这种特征在分布上具有一定的稳定性,当某一时间区间内有目标经过时,关联特征就会发生变化,通过关联特征的变化进而检测出暗弱运动目标的存在,然后通过时间窗口滑动遍历单个像元上的整个时序信号来构建全局特征。

这种关联特征的提取方式能够避免暗弱运动目标的特征被背景或噪声湮没,时间窗口的大小也会影响到关联特征的提取。时间窗口越小则关联特征的灵敏度越高,对应的稳定性会降低,而当窗口选取过大时,关联特征的变化则不会很明显,不易检测出暗弱运动目标。在实际检测中,会根据帧频大小、目标驻留时间等因素来划分时间窗口的大小,一般时间窗口的大小选择在 5~30 之间。

关联检测方法的流程图如图 1 所示。

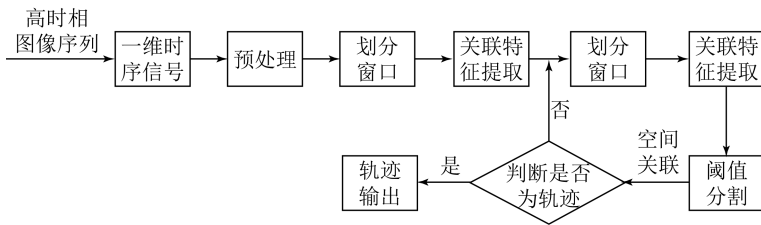


图 1 关联检测方法流程

Fig. 1 Flow diagram of association detection method

Step 1: 将输入的高帧频图像序列在时序上做归一化预处理。

Step 2: 在每一个像元的时序信号上根据帧频以及信号驻留时间等因素划分时间窗口,然后进行第一次关联特征提取,考虑到噪声的影响,该值不一定最大,提取到的特征值反映了包括目标信号以及噪声带来的分布变化。

Step 3: 在第一次提取到的关联特征基础上再进行窗口划分和第二次关联特征提取,由于背景、噪声和目标三者的连续性不一致,且目标变化相对剧烈,噪声的分布相对稳定,进而通过阈值分割提取出目标信号。

Step 4: 将提取出的目标信号进行空间轨迹关联,若邻近像元内存在检测出的目标信号,则判断为轨迹,反之,若没有轨迹输出则返回第二次窗口划分处改变参数继续进行检测。

3 实验与分析

首先通过时域上的仿真实验来验证统计关联特征的有效性,然后通过处理低信噪比的半物理仿真图像序列将该方法与其他常用方法作比较,最后利用天文台的真实数据对该方法进行实验验证,并与其他方法作比较分析。

3.1 仿真实验

3.1.1 时序信号仿真实验

为了验证统计关联特征的有效性,在一维高斯噪声、泊松噪声、瑞丽噪声、韦布尔噪声等背景下添加一定长度低信噪比的目标信号以仿真单像元中的时序信号,目标信号由式(8)产生:

$$I(t) = A \exp\left\{ \frac{-[v(t-t_0)]^2}{2\sigma_s^2} \right\}, t_1 < t < t_2, \quad (8)$$

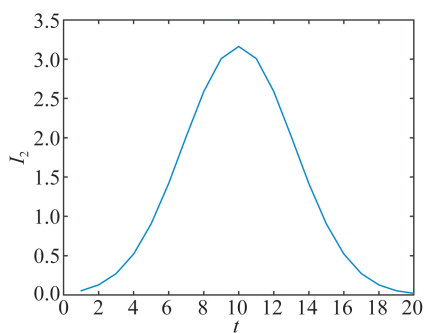
其中: $I(t)$ 为目标信号的强度大小, A 表示在时间

t 处目标信号的大小, t_0 处目标信号强度取得最大值, 即此时目标信号位于该像元的中心位置, t_1, t_2 表示目标信号进入和离开该像元的时间点, v 为该目标的运动速率, σ_s 表示传感器在二维空间坐标上的扩展参数。

本文中信噪比的定义为:

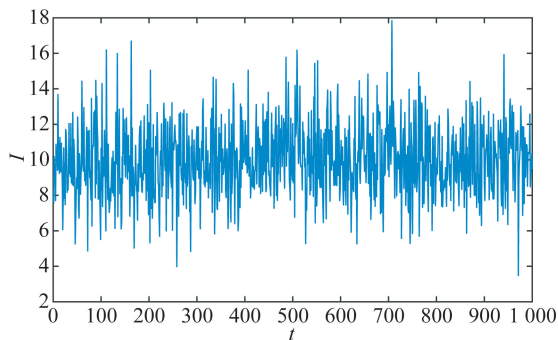
$$SNR = 10 \log \left(\frac{p_s - \sigma_n}{\sigma_n} \right), \quad (9)$$

其中: p_s 表示目标信号的平均功率, σ_n 表示噪声功率。信噪比为 -5 dB 的目标信号波形图及在高斯噪声中加入目标信号的波形图如图 2 所示, 横坐标为时间 t , 纵坐标为信号强度 I 。图 2(b) 中高斯噪声均值为 10, 方差为 2, 目标信号加入的时刻在 $t=500$ 处, 可见该目标信号完全湮没在高斯噪声之中。图 3 为在不同噪声背景下, 分别加入信噪比为 $0, -2, -5, -8$ dB 的目标信号后利用关联检测方法进行检测的结果, 横坐标为时间 t , 纵坐标为关联后的特征值 E 。



(a) 目标信号

(a) Target signal



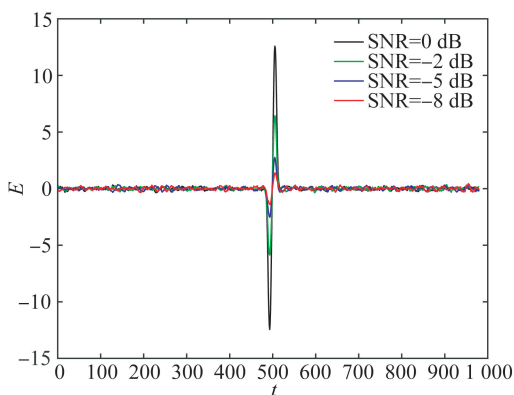
(b) 高斯噪声中加入目标信号

(b) Gaussian noise mixed with target signal

图 2 目标信号和原始数据

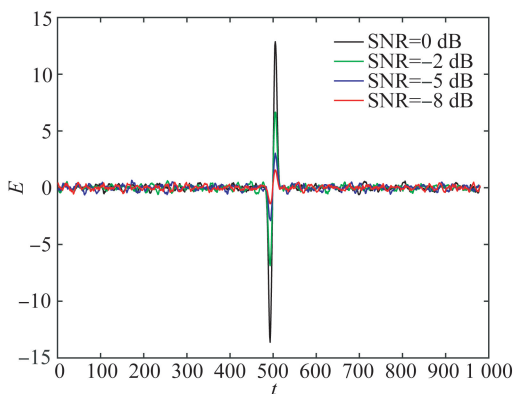
Fig. 2 Target signal and raw data

结合图 2(b) 和图 3(a) 可以看出尽管目标信号被湮没在高斯噪声中, 但利用关联检测方法能检测出信噪比分别为 $0, -2, -5, -8$ dB 的目标信号。图 3(b)、图 3(c) 和图 3(d) 为其他背景下的检测结果, 结果和在高斯背景下的结果相近, 验证了该关联检测算法的有效性。



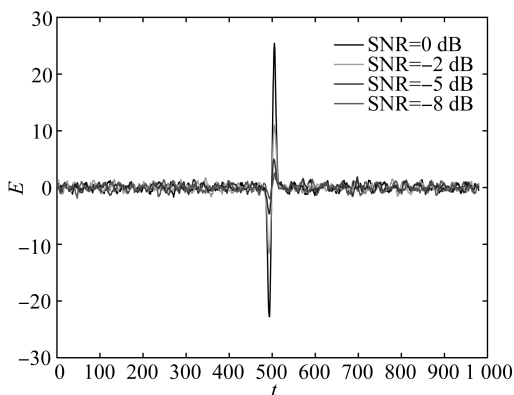
(a) 高斯噪声

(a) Gaussian noise



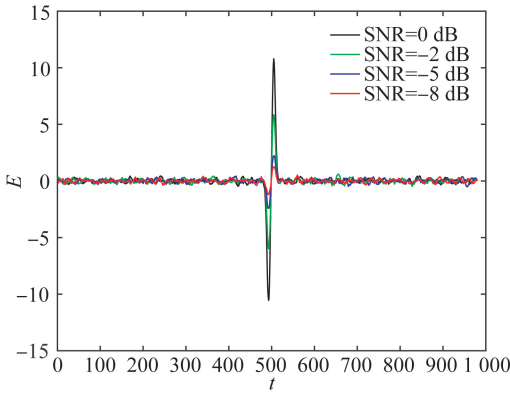
(b) 泊松噪声

(b) Poisson noise



(c) 瑞丽噪声

(c) Rayleigh noise



(d) 韦布尔噪声

(d) Weibull noise

图 3 不同噪声条件下仿真检测结果

Fig. 3 Simulation test results under different noise conditions

3.1.2 暗弱运动目标半物理仿真实验

为了进一步验证该关联检测算法在图像序列中检测目标信号的有效性和泛化能力,以真实采集的 1 000 帧图像序列为背景图像,其图像大小为 128×128 ,然后由式(8)仿真得到信噪比为 -5 dB 的一序列亚像素运动目标信号,再将该目标信号加入到真实采集的背景图像序列中去,进而得到半物理仿真的含有暗弱运动目标的图像序列,且该目标信号一共经过 41 pixel,最后用文中方法进行检测,并与最大中值滤波^[22]、最大均值滤波^[23]、局部对比度(Local Contrast Measure, LCM)^[24]、红外补丁图像(Infrared Patch-Image, IPI)模型^[25]、背景建模以及基于三维离散拉东变换 6 种常用运动目标检测方法作对比分析。最大中值滤波和最大均值滤波能较好地抑制孤立噪声点,有效提高信噪比,并能有效保留结构背景的边缘信息,有助于检测小目标;LCM 能增强真实目标并同时抑制其他类型的干扰;IPI 能稳定地适用于不同的目标大小和信噪比值;背景建模具有快速有效的特点,不易受环境光线影响;三维离散拉东变换是盲搜索问题的优化算法。以上 6 种方法常用于检测运动小目标,且在特定场景下都有较好的检测效果。

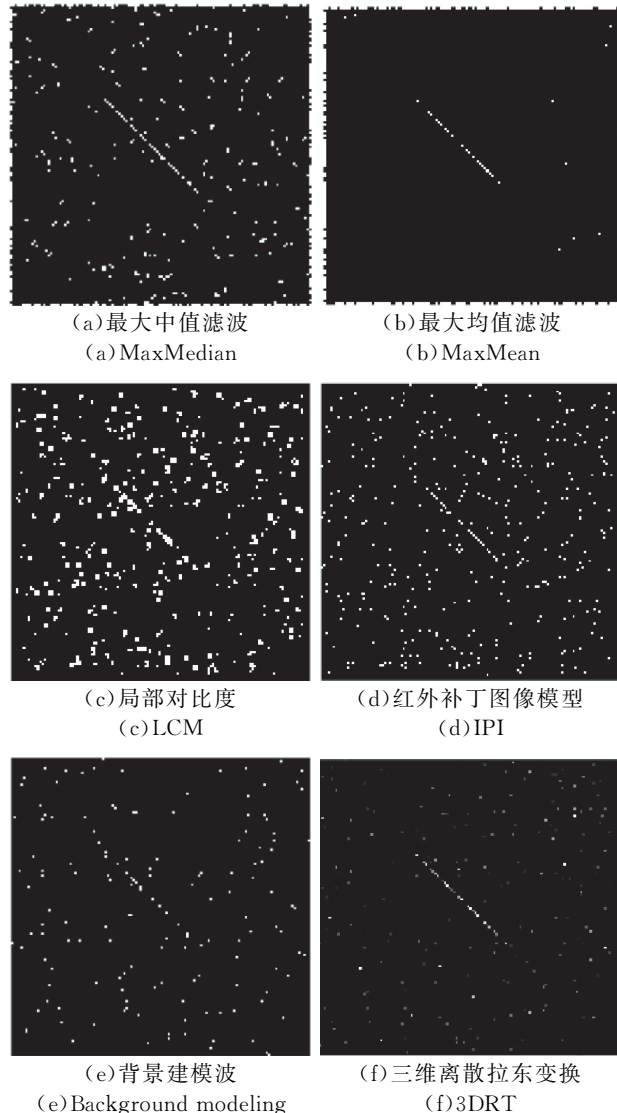
图 4(a)和图 4(b)分别为基于最大中值滤波和最大均值滤波的处理结果,图 4(c)和图 4(d)分别为基于 LCM 和 IPI 的处理结果,图 4(e)和图 4(f)则分别为基于背景建模和基于三维离散拉东变换的处理结果,图 4(h)为通过本文方法处理的

结果。表 1 为上述各种方法的目标检测率和虚警率,检测率 D 表示正类样本被正确分类的数目占所有正类样本的比例,这里正类样本即为目标轨迹;虚警率 P 表示在负类样本中被分为正类样本的数目占所有负类样本的比例,负类样本即表示除去目标轨迹的所有像元数目, D 和 P 的计算公式分别为:

$$D = \frac{N_{TP}}{N_P}, \quad (10)$$

$$P = \frac{N_{FP}}{N_N}, \quad (11)$$

对应于实验场景,式中 N_{TP} 表示目标轨迹上被检测出的像元数目, N_P 表示目标轨迹总的像元数目, N_{FP} 表示非目标轨迹上被检测出的像元数目, N_N 表示除去目标轨迹的所有像元数目。

(a) 最大中值滤波
(a) MaxMedian(b) 最大均值滤波
(b) MaxMean(c) 局部对比度
(c) LCM(d) 红外补丁图像模型
(d) IPI(e) 背景建模
(e) Background modeling(f) 三维离散拉东变换
(f) 3DRT



(h)本文方法
(h)Ours
图 4 不同方法检测结果

Fig. 4 Test results by different methods

表 1 不同方法检测结果对比

Tab. 1 Detection results of different methods (%)

方法	虚警率	检测率
MaxMedian	3.66	76.04
MaxMean	1.36	51.22
LCM	5.18	58.54
IPI	5.19	56.10
Background modeling	0.85	31.71
3DRT	0.21	60.98
Ours	0.09	87.80

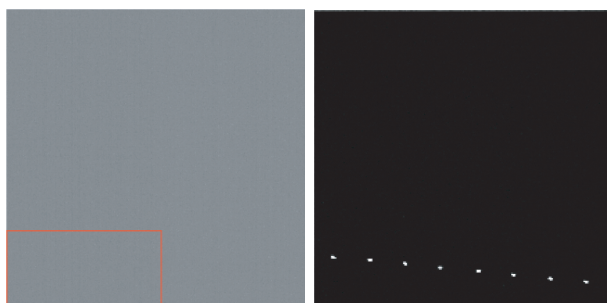
从对比结果中可以看出,通过本文方法的检测效果最佳,其检测率为 87.8%,比其他方法的检测率至少高出 11%,虚警率为 0.09%,也远低于其他方法的虚警率。进而验证了该关联检测算法在图像序列中检测暗弱运动目标信号的可行性和有效性。

3.2 近地小行星检测实验

为了进一步验证该关联检测算法在实际暗弱运动目标探测中的性能,用该算法进行近地小行星的检测实验。

使用中科院国家天文台兴隆站天文望远镜以凝视模型观测 15.8 星等的近地小行星,望远镜口径 50 cm,焦比 $f/9.5$,单像元规格 6.5 mm,以大小为 $2\ 048 \times 2\ 048$,帧频为 1 000 的采样频率进行采样,图 5(a)为原始图像,图 5(b)为利用本文方法的检测结果,从图 5(a)中可以看出在原始图像的天光条件下,目标完全湮没在观测背景中,从图 5(b)的检测结果可以看出,利用本文提出的关联检测算法成功地检测出了该近地小行星,根据检

测结果中的目标位置,在原始数据中由公式(9)求得该近地小行星的信噪比约为 -4 dB。

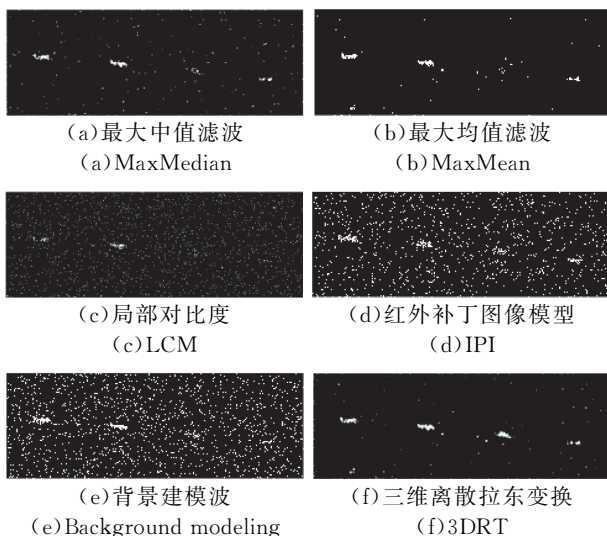


(a)原始图像
(a)Original image
(b)检测结果
(b)Test results

图 5 原始图像和检测结果

Fig. 5 Original image and experimental result

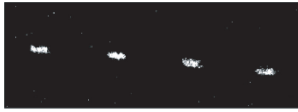
为了便于与其他检测方法作比较,选取图 5(a)中红色框里的区域作为检测区域(彩图见期刊电子版),图 6 为分别利用最大中值滤波、最大均值滤波、LCM、IPI、背景建模、三维离散拉东变换和本文方法对图 5(a)中红框里的区域进行检测的结果对比图,表 2 为图 6 中几种方法对该局部区域进行检测的目标检测率和虚警率的统计表,检测率和虚警率分别由式(10)和式(11)求得。从表 6 可以看出,这 7 种方法中利用本文方法的检测结果在检测率和虚警率两方面均明显优于其他方法,在虚警率低至 0.05%的情况下能达到高于 70%的目标检测率,且检测率高于其他方法 9%以上,从而验证了该关联检测算法在实际暗弱运动目标探测中的高效性和可行性。



(a)最大中值滤波
(a)MaxMedian
(b)最大均值滤波
(b)MaxMean

(c)局部对比度
(c)LCM
(d)红外补丁图像模型
(d)IPI

(e)背景建模波
(e)Background modeling
(f)三维离散拉东变换
(f)3DRT



(h)本文方法

(h)Ours

图 6 局部区域检测结果

Fig. 6 Local area detection results

表 2 局部区域检测结果对比

Tab. 2 Comparison of local area detection results (%)

方法	虚警率	检测率
MaxMedian	0.37	27.56
MaxMean	0.18	24.05
LCM	4.85	53.54
IPI	1.89	17.23
Background modeling	4.18	49.78
3DRT	0.28	61.36
Ours	0.05	70.56

结合分析结果,本文主要创新点体现在:

(1)利用目标运动导致时间维度上关联分布的异常来反演运动目标特性,不直接依赖于目标能量和背景、噪声能量之间的差异;(2)关联特征的提取方式采用在时域上两次提取局部特征再提取全局特征的特征提取方法,增加了目标特征信息提取的准确度;(3)不依赖于空间和时间滤波,简化运动目标的检测过程,检测时间短,能降低对系统的能量要求,进而可实现高速多目标的实时检测。

4 结 论

本文针对被动探测中极低信噪比高速运动目

标难以检测问题,提出一种基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测方法。基于强背景信号的涨落在时间维度上稳定分布和稳定变化的特点,利用目标运动导致的瞬态涨落在时间维度上分布的变化反演出运动目标的存在。通过将目标检测问题建模为基于单个像元灰度时序序列的一维信号检测问题,采用在时域上划分时间窗口的方式来提取关联特征,由关联特征的变化来检测目标信号。

一维时序信号的仿真实验在高斯噪声、泊松噪声、瑞丽噪声、韦布尔噪声等背景下检测出了信噪比低至 -8 dB的目标信号。暗弱运动目标半物理仿真实验验证了该关联检测算法在图像序列中检测暗弱运动目标信号的可行性和有效性,同时与其他常用运动目标检测方法进行对比分析,实验结果表明,与经典检测算法相比,该方法在检测极低信噪比暗弱运动目标方面表现得更好,在该仿真实验中,对于信噪比为 -5 dB的运动目标,其检测率为 87.80% ,比其他几种方法的检测率至少高出 11% ,虚警率为 0.09% ,也远低于其他几种方法的虚警率。在真实实验中,在目标信号完全湮没于背景噪声中的天光背景下成功检测出了 15.8 星等的近地小行星,且轨迹清晰,检测结果在检测率和虚警率方面都明显优于其他几种常用方法,进一步验证了基于涨落分析的关联检测方法的实用性和有效性。上述实验表明了该暗弱运动目标关联检测方法在仿真数据和真实实验数据中都有很好的检测效果。

致 谢:感谢兴隆站 1 m望远镜和 50 cm望远镜全体工作人员的支持,本文部分工作得到中国科学院智能红外感知重点实验室开放课题和北京市重大科技专项课题资助。

参考文献:

- [1] SHAO M, NEMATI B J, ZHAI CH X, *et al.*. Finding very small near-earth asteroids using synthetic tracking [J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 782(1): 1-10.
- [2] MARTIN L B. A fast discrete approximation algorithm for the radon transform [J]. *SIAM Journal on Computing*, 27(1):107-119, 1998.
- [3] JULIAN B. ROAD: *Rapid Optical Asteroid Detection* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- [4] 夏均忠,刘远宏,冷永刚,等. 微弱信号检测方法的现状分析 [J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(3): 156-161.
- [5] XIA J ZH, LIU Y H, LENG Y G, *et al.*. Analysis of current status of weak signal detection methods [J]. *Noise and Vibration Control*, 2011, 31(3): 156-161. (in Chinese)
- [6] HUANG F Y, SHEN X J, LIU X M. Detection of super wide-field infrared target based on spatial-temporal fusion processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2328-2338.
- [7] LIN J N, NIE X, UNBEHAUEN R. Two-dimensional

- LMS adaptive filter incorporating a local-mean estimator for image processing[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II Analog and Digital Signal Processing*, 1993, 40(7): 417-428.
- [7] KHAN J F, ALAM M S. Efficient target detection in cluttered FLIR imagery [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5816: 39-53.
- [8] FARAJZADEH M, MAHMOODI A, ARVAN M R. Detection of small target based on morphological filters[C]. *Conference on Electrical Engineering. IEEE*, 2012: 1097-1101.
- [9] DAVISON G, GRIFFITHS H D. Wavelet detection scheme for small targets in sea clutter[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(19):1128.
- [10] LIU G, YOU Y, ZHENG S, et al.. Moving target detection based on improved mixture gauss model [J]. *Communications in Computer & Information Science*, 2012, 346: 261-266.
- [11] HE L H, GE L. Cam shift target tracking based on the combination of inter-frame difference and background difference[C]. *Chinese Control Conference (CCC). IEEE*, 2018: 9461-9465.
- [12] 刘洪彬,常发亮. 权重系数自适应光流法运动目标检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 460-468.
- LIU H B, CHANG F L. Moving object detection by optical flow method based on adaptive weight coefficient[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 460-468. (in Chinese)
- [13] POHLIG S C. Spatial-temporal detection of electro-optic moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(2): 608-616.
- [14] LI X, WANG S, ZHENG D. A DP-TBD algorithm with adaptive state transition set for maneuvering targets[C]. *IEEE CIE International Conference on Radar (RADAR)*, 2016: 1-4.
- [15] 林建舜,平西建,马德宝. 采用 DBT 的漂移扫描星图小目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3440-3446.
- LIN J L, PING X J, MA D B. Small target detection method in drift-scanning image based on DBT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3440-3446. (in Chinese)
- [16] 徐英,谷雨,彭冬亮,等. 基于 DRGAN 和支持向量机的合成孔径雷达图像目标识别[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 727-735.
- XU Y, GU Y, PENG D L, et al.. SAR ATR based on disentangled representation learning generative adversarial networks and support vector machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(3): 727-735. (in Chinese)
- [17] 张乾. 基于随机森林的视觉数据分类关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
- ZHANG Q. *Visual Data Classification Based on Random Forests*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 范丽丽,赵宏伟,赵浩宇,等. 基于深度卷积神经网络的目标检测研究综述[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1152-1164.
- FAN LL, ZHAO H W, ZHAO H Y, et al.. Survey of target detection based on deep convolutional neural networks[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(5): 1152-1164. (in Chinese)
- [19] 马立,巩笑天,欧阳航空. Tiny YOLOV3 目标检测改进[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 988-995.
- MA L, GONG X T, OUYANG H K. Improvement of Tiny YOLOV3 target detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 988-995. (in Chinese)
- [20] 赵磊,俞信,陈翼男,等. 光子图像中基于广义似然比检验的目标探测方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(1):91-96.
- ZHAO L, YU X, CHEN Y N, et al.. Object detection method based on generalized likelihood ratio tests method in photon images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1):91-96. (in Chinese)
- [21] 寇松峰. APD 光子计数成像技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
- KOU S F. *Research on APD Photon Counting Imaging Technology* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [22] 岳付昌. 基于最大中值滤波和 K-means 聚类红外弱小目标检测 [J]. *光电应用技术*, 2018(5): 41-43.
- YUE F CH. Infrared dim and small target detection based on max-median filter and K-means clustering algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018(5):41-43. (in Chinese)
- [23] DESHPANDE S D, ER M H, RONDA V, et al.. Max-Mean and Max-Median filters for detection of small-targets[J]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 1999, 3809: 74-83.
- [24] HAN J, LIANG K, ZHOU B, et al.. Infrared

- small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2018;1-5.
- [25] GAO C, MENG D, YANG Y, *et al.*. Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12):4996-5009.
- [26] BAI X Z, ZHOU F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(6):2145-2156.
- [27] 王凯, 吴敏, 姚辉, 等. 多帧背景差与双门限结合的运动目标检测方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2017, 38(1): 179-183.
WANG K, WU M, YAO H, *et al.*. Moving target detection method based on multi-frame background subtraction and doublethreshold[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017, 38(1): 179-183. (in Chinese)
- [28] DENG L Z, ZHU H, TAO C, *et al.*. Infrared moving point target detection based on spatial-temporal local contrast filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76:168-173.
- [29] NIU W L, ZHENG W, YANG Z, *et al.*. Moving point target detection based on higher order statistics in very low SNR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(2):217-221.
- [30] LUO Q, WANG Y F. Early warning radar clutter suppression and dim moving target detection algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, 38(3):369-373.
- [31] 董潇潇, 何小海, 吴晓红, 等. 基于注意力掩模融合的目标检测算法[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(8): 825-833.
DONG X X, HE X H, WU X H, *et al.*. Object detection algorithm based on attention mask fusion [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(8): 825-833. (in Chinese)

作者简介:



邓昊(1995-),男,湖北利川人,硕士研究生,2018年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事图像处理与微弱信号检测方面的研究。E-mail: denghao@buaa.edu.cn

通讯作者:



郑伟(1974-),男,河南郑州人,工学博士,副研究员,硕士生导师,1996年于西北工业大学获得学士学位,2001年于中科院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,2009年于中科院国家空间中心获得博士学位,主要从事微弱信号处理、非线性信号处理与天基信息处理方面的研究。E-mail: zhengwei@nssc.ac.cn