

## 基于时空域的暗弱空间运动点目标检测算法

王敏<sup>①②</sup> 赵金宇<sup>\*①</sup> 陈涛<sup>①</sup> 崔博川<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 为了对空间目标进行精确定位与跟踪,建立目标运动轨迹,该文对基于运动信息的星图暗弱空间运动点目标检测算法进行研究。首先建立一种新的空间运动点目标描述模型,然后提出基于相关系数矩阵的运动点目标检测算法,最后提取目标运动轨迹,并给出了点目标运动速度的估计模型。根据实测数据和硬件平台,提出了检测概率和虚警率相结合的评价方法对算法进行验证。试验结果表明,所提方法能够在保持较低的虚警概率下获得较高的检测概率,优于参与比较的其它目标检测方法。与单纯扩大望远镜口径相比,该方法为提高空间暗弱目标识别能力提供了具有更高性价比的有效途径。

**关键词:** 目标检测; 运动点目标; 时空域互相关; 轨迹提取

**中图分类号:** TP391.4; P123.46

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)07-1578-07

**DOI:** 10.11999/JEIT161044

## Moving Point Object Detection from Faint Space Based on Temporal-spatial Domain

WANG Min<sup>①②</sup> ZHAO Jinyu<sup>①</sup> CHEN Tao<sup>①</sup> CUI Bochuan<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To accurately locate, track space targets, and establish targets trajectory, a study on moving target detection based on motion information for star maps is practiced. Firstly, a new model to characterize the space moving target is constructed, then an algorithm for moving point target detection is proposed based on correlation coefficient matrix statistical information. Based on the detection method, target motion trajectory is finally extracted and the velocity estimation model of the moving target is built. This paper also proposes an evaluation method, which combines detection probability and false alarm probability, to verify this method. The experimental results demonstrate that the proposed method outperforms the compared methods and can achieve high detection probability while keeping low false alarm probability. Compared with simply expanding telescope diameter, this method provides a higher performance-price ratio way to improve the ability of space target detection.

**Key words:** Target detection; Moving point target; Temporal-spatial domain correlation; Trajectory extraction

### 1 引言

空间目标主要是指卫星,也包括各种空间碎片<sup>[1]</sup>,如进入空间轨道的助推火箭,保护罩和其它物体,还包括进入地球外层空间的各种宇宙飞行器,如彗星和小行星。空间目标检测是根据拍摄到的序列星图对太空目标进行搜索定位的过程,是空间信

息应用研究的重要方向,是空间态势感知的重要组成部分,也是确保载人航天安全的重要技术保障。

长期以来,暗弱背景下的空间目标检测一直都是国内外研究的热点。由于目标和背景恒星都近似为点目标成像,难以利用目标的灰度特征,区域特征,形状,颜色以及纹理等视觉特征区分目标和背景恒星,因此学者们根据空间目标与背景恒星成像运动特征上的差异,利用多帧序列星图对运动目标进行检测。几种具有代表性的检测算法包括:背景差分法,光流分割法,先跟踪后检测法,帧间差分法。背景差分法<sup>[2-5]</sup>是利用图像序列中的当前帧和背景参考模型比较来检测运动物体的一种方法,其性能依赖于所使用的背景建模技术,因此鲁棒性较

收稿日期: 2016-10-12; 改回日期: 2017-02-27; 网络出版: 2017-04-14

\*通信作者: 赵金宇 zhaoyj@ciomp.ac.cn

基金项目: 国家 863 计划项目(2011AA8082035), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(065X32CN60)

Foundation Items: The National 863 Program of China (2011AA 8082035), The Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, the Third Phase of Innovative Engineering Projects (065X32CN60)

差；光流法<sup>[6-9]</sup>基本思想是赋予图像中的每一个像素点一个速度矢量，通过判断光流矢量在整个图像区域是否连续变化来检测运动目标，但是该方法计算复杂度较高，受噪声的影响较大，因此多适用于目标运动速度不大，图像噪声比较小的情况；先跟踪后检测方法<sup>[10-12]</sup>不对单帧图像中有无目标进行判断，而是对图像中大量候选目标轨迹同时进行跟踪，然后根据制定的多帧图像检测判据排除虚假轨迹，维持真实轨迹；帧间差分法<sup>[13-15]</sup>是一种对图像序列中相邻两帧作差分运算来提取运动目标的方法，优点是算法实现简单，计算复杂度低，对光线等场景变化不敏感，缺点是处理效果高度依赖于选择的帧间时间间隔。

综上所述，传统方法主要是利用空间域信息，引入时间域作为辅助，进行目标检测，没有充分利用点目标信号的时域分布信息。本文提出了一种基于时域空域的空间运动点目标检测算法，充分利用空间目标在时域上的分布信息，同时结合其空域相关性，进行空间目标的检测和轨迹提取。

## 2 相关模型建立

### 2.1 星图描述模型

空间目标和恒星在空域上成像相似，都表现为单帧图像上的孤立亮斑，且形状相似。二者区别表现在：时域上，空间目标表现出明显的运动特性，而恒星则保持相对静止。因此，本文在研究图像序列空间域相关的基础上，增加了对其时间维度的分析，构建了新的 CCD 图像序列描述模型：

$$f_{i,j}(k) = t_{i,j}(k) + s_{i,j}(k) + n_{i,j}(k) \quad (1)$$

其中， $f_{i,j}(k)$  表示  $(i,j)$  处像元在第  $k$  帧时的总灰度值； $t_{i,j}(k)$  表示  $(i,j)$  处像元在第  $k$  帧时的目标灰度值； $s_{i,j}(k)$  表示  $(i,j)$  处像元在第  $k$  帧时的恒星灰度值； $n_{i,j}(k)$  表示  $(i,j)$  处像元在第  $k$  帧时的噪声灰度值（背景看作噪声）。

利用式(1)所示的图像序列描述模型，本文将星图由传统的空域描述方式转换为时域描述方式，从而可以方便地分析星图的时域特性，为本文运动目标检测算法提供基础。

### 2.2 3 维坐标下的空间运动点目标描述模型

本文提出了基于 3 维坐标的线性数学模型来描述空间运动点目标，简称 LINE 模型，模型的构建基于以下两个条件：(1)星图中目标成像为点状分布，并且服从 2 维高斯分布；(2)空间目标运动轨迹具有连续性和规则性。序列星图都是在很短的时间间隔内连续拍摄得到的一系列图像，对于同一空间目标，认为其近似服从匀速直线运动<sup>[16]</sup>。

如图 1 所示，本文在传统的空间维度  $(x,y)$  下加入了时间维度  $t$ ，选取若干帧为例，其中黑点表示恒星背景，红点表示空间目标，任一目标物沿着时间轴，从第 1 帧至最后 1 帧的排列成直线，投影到一幅图上为一条直线，即点目标在观察区内以近似恒定的速度移动。传统的方法多是将多帧星图直接进行叠加或相减，本文提出的 LINE 模型则是选取连续帧的星图按照时间顺序依次排列，根据本文构建的信号描述模型(式(1))，每个像元位置对应一个时序信号，在空间运动点目标轨迹提取过程中，以时序信号为主要研究对象，同时研究其在空间域的相关特性。此方法能够同时探测多个暗弱小目标和运动轨迹不可预测的未知太空碎片。

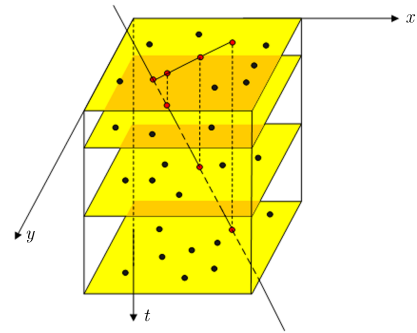


图 1 LINE 模型

### 2.3 速度估计模型

假设利用  $n$  帧星图检测出一段目标轨迹  $T_1$ ，从目标运动起始位置到终点位置，没有目标在重复位置出现，即轨迹包含  $n$  个目标点，假设这段轨迹起点和终点质心坐标分别为  $(x_i, y_i), (x_{i+n}, y_{i+n})$ ，则它的平均运动矢量为

$$(\bar{X}, \bar{Y}) = \left[ \frac{1}{n-1}(x_{i+n} - x_i), \frac{1}{n-1}(y_{i+n} - y_i) \right] \quad (2)$$

平均运动速度为

$$\bar{v} = \sqrt{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \quad (3)$$

运动方向角度为

$$\beta = \arctan \frac{|y_{i+n} - y_i|}{|x_{i+n} - x_i|} \quad (4)$$

所以，对于任意帧图像上运动点目标质心坐标  $(x_0, y_0)$ ，则下一帧点目标质心坐标为

$$(x_i, y_i) = (x_0 + \bar{v} \cdot \cos \beta, y_0 + \bar{v} \cdot \sin \beta) \quad (5)$$

## 3 基于统计相关的运动点目标检测算法

### 3.1 信号互相关

信号互相关理论可以用于空间运动点目标检测的依据是：运动的空间目标会影响时序信号的相似

性。使用 2.1 节所述的星图描述模型可以引入时间维度,以时间维度为视角,含有运动目标的像素由于目标的运动在时间维度上出现“扰动”,而恒星和背景在时间维度上则是静止的,只有图像噪声的扰动,理想无噪声情况下,在时间维度上应该是一条直线。因此,目标信号和噪声信号不相似,但是对于噪声和噪声信号,目标和目标信号都具有相似性。这样,两个时序信号的相似性可以描述它们是否同属于含有目标的信号。对于 LINE 模型中的两个时序信号,根据它们是否含有目标,会出现 3 种情况:(1)两个信号都含有目标;(2)其中一个含有目标;(3)两个信号都不含有目标。为此本文选择了两个目标信号和两个噪声信号,分别计算其相关函数,结果如图 2 所示。

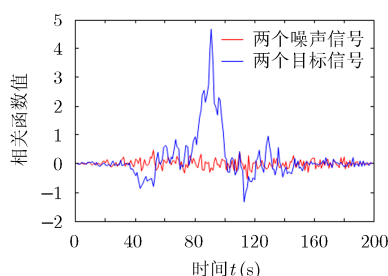


图 2 相关函数示意图

蓝色线和红色线分别表示两个目标信号和两个噪声信号的相关函数计算结果。可以看出,由于相关函数描述了两个信号在不同时延下的相似程度,目标经过不同像元的时间不同,因此,各个含有目标的像元所形成的时序信号在计算相关函数时,具有峰值;而不含有目标的像元形成的时序信号在计算相关函数时无明显特征变化。

### 3.2 检测算法

本文引入相关系数矩阵进行目标轨迹的提取,相关性系数为其矩阵元,其物理含义是:矩阵中的任意元素描述了两个信号之间的相似性大小。

(1)相关系数矩阵: 光学成像系统中,点目标成像符合高斯扩散函数分布,本文在 LINE 模型的 X-Y 截面首先选取一个大小为  $3 \times 3$  的滑动窗口,该窗口内每一个像元在时间轴上组成一个时序信号,如图 3 所示。窗口大小选择基于以下理论:(1)星图中运动目标占据较少的像素,当星点扩散半径  $\sigma < 0.671$  时,95%的能量集中在  $3 \times 3$  的像元上;(2)星点中心灰度值最大,并且周围 8 个像元的灰度值大于星图平均灰度值。

从左到右,从上到下依次排列组成一个信号矩

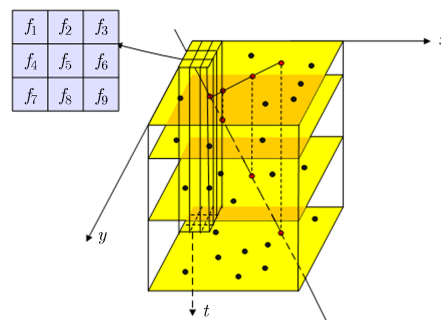


图 3 包含 9 个信号的  $3 \times 3$  窗口

阵:  $\mathbf{sM} = \{f_1, f_2, \dots, f_8, f_9\}$ , 矩阵的每一列都是一个时序信号,信号长度为图像的帧数。相关系数矩阵定义为

$$\mathbf{cM} = \begin{bmatrix} \rho(f_1, f_1) & \rho(f_1, f_2) & \cdots & \rho(f_1, f_9) \\ \rho(f_2, f_1) & \rho(f_2, f_2) & \cdots & \rho(f_2, f_9) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(f_9, f_1) & \rho(f_9, f_2) & \cdots & \rho(f_9, f_9) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $\rho(\cdot)$  代表两个信号的相关性系数,对于  $n \times n$  大小的窗口,对应的相关系数矩阵大小为  $n^2 \times n^2$ 。

(2)判断依据: 为了对相关系数矩阵的特性进行直观分析,本文选取了 120 幅星图,即每一个时序信号的信号长度为 120,分别选取若干组包含有目标的窗口和不含有目标的窗口,窗口大小为  $3 \times 3$ ,计算相应的相关矩阵。然后将相关矩阵映射为包含有 9 组  $3 \times 3$  像元的图像,相关矩阵中值为 1 的元素映射为白色,0 到 1 之间的映射为灰色,值越接近于 1 像元越接近于白色,小于 0 的映射为黑色。选取其中两组窗口展示如图 4 所示。

由图 4 可以看到,对角线位置都为白色,因为相关系数矩阵的对角线位置是自相关系数,相关性最大,值为 1,其它位置保持对称;图 4(a),图 4(b)为两个包含目标的窗口计算结果,除去对角线位置,其它地方也存在较多亮色像元;而图 4(c),图 4(d)为两个不含有目标的窗口计算结果,除去对角线位置,其它地方则颜色较暗,接近于黑色。

分析相关矩阵的物理意义可知,当截取的窗口中含有目标时,其映射图像除去对角线位置,其它像元颜色较亮,说明图像邻域内的像素具有较高的相关性,同时由于目标的运动带来了时间维度的波动,因此该窗口内相关系数具有较大的方差;而对于不含有目标的窗口,各个信号的相关性较低,表现为相关矩阵像元颜色则较暗,由于该窗口内的时间维度具有平稳性,从而具有较小的方差。这样含有目标的窗口与不含有目标窗口的相关系数矩阵就

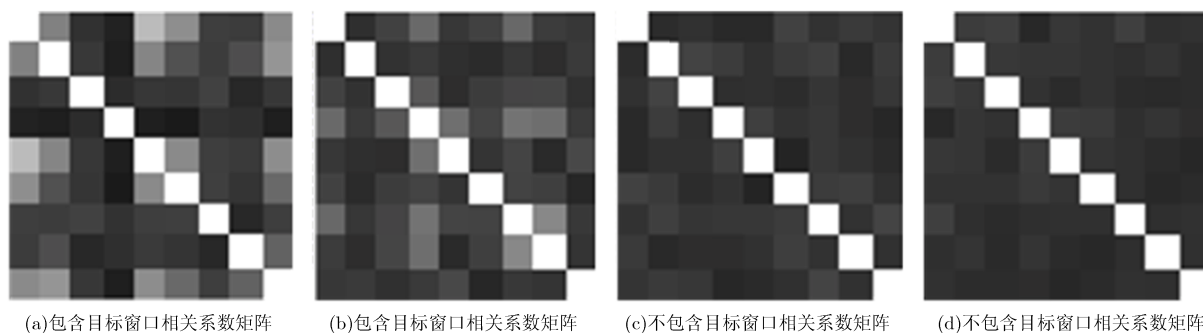


图 4 包含目标窗口和不包含目标窗口的相关性系数矩阵计算结果

有如下区别：(1)含有目标窗口的相关系数矩阵具有更多的亮像元；(2)含有目标窗口的相关系数矩阵具有更大的方差。因此，本文将对所有图像的相关系数矩阵计算方差，并利用方差阈值实现运动点目标的轨迹提取。

## 4 实验结果分析

### 4.1 实验条件

本文所使用星图是由中国科学院 600 mm 口径的大视场 ( $4.8^\circ$ ) 光学望远镜拍摄的，实验中采用恒星模式的拍摄方式对星空成像，本文以其中一组图像的数据处理结果为例，图像大小为  $512 \times 512$ ，共 60 帧，包含有两个运动点目标，目标运动轨迹如图 5 红色线段所示。为了进行对比验证，本文选择传统帧间差分法、改进帧间差分法<sup>[15]</sup>以及交叉投影方法<sup>[17]</sup>作为对比方法。由于交叉投影方法需要进行图像预处理，为进行公平比较，本文首先采用预处理方法<sup>[17]</sup>进行星图预处理。本文实验的信号长度并没有选取一次观测的全部帧图像，而是其中一段，如果选取的信号长度太长，就会因为这段时间内噪声的变化趋势相同，噪声时序信号的相似性过大，即使不含有目标的窗口，局部协方差矩阵的方差也会很大，进而影响判断结果。

### 4.2 试验结果与评价分析

基于上述理论分析，本文首先计算原始星图的局部协方差矩阵，结果如图 6(a)所示。可以看出，

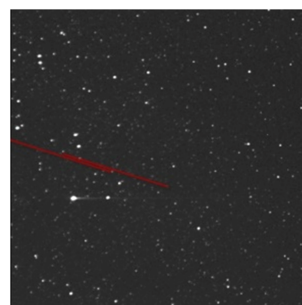
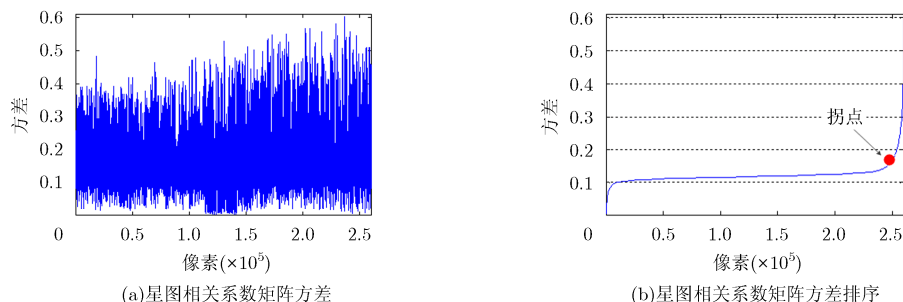


图 5 目标运动轨迹

相关系数主要在 0.15 附近波动，但是像素具有较大的方差，这些方差较大的位置即为含有目标的位置。设定一定的阈值，即可提取目标的运动轨迹。本文采取自动方式设定阈值，为此首先对所有方差进行排序，如图 6(b)所示。可以看出方差曲线有明显的拐点，在拐点以前，方差较小，且较为平稳，这些方差对应的像素主要为背景和恒星；在拐点以后，方差剧烈上升，这些较大的方差对应运动目标。因此，确定阈值的关键是方差曲线拐点的确定，利用拐点前后方差曲线梯度的变化，可以方便地计算曲线的拐点。需要说明的是，本文中“拐点”指的是曲线变化率较大的点，而不是传统意义上二阶导数为 0 的拐点。

为研究不同窗口大小对目标检测的影响，本文研究了在窗口大小为  $5 \times 5$  时的情况，各像素方差大小如图 7(a)所示，对方差进行排序结果如图 7(b)所

图 6 所有滑动窗口的相关系数矩阵方差分布，窗口大小为  $3 \times 3$ ，其中红色圆点表示方差曲线的拐点



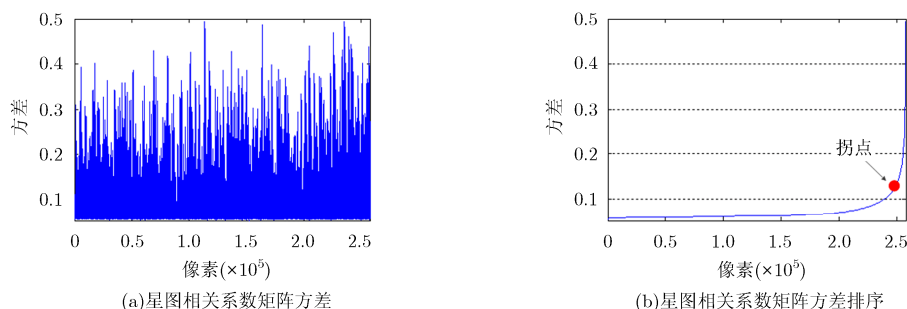


图7 所有滑动窗口的相关系数矩阵方差分布, 窗口大小为  $5 \times 5$ , 其中红色圆点表示方差曲线的拐点

示。当窗口大小为  $5 \times 5$  时, 各像素方差比窗口大小为  $3 \times 3$  时更平稳, 说明增大窗口对像素方差有平滑作用, 对于星图而言, 运动目标往往占据较少的像素, 如果窗口过大, 则容易被背景平滑, 从而不利于目标检测。从图 7(b)可以看出, 当窗口大小为  $5 \times 5$  时, 方差同样具有明显的拐点, 且拐点位置与  $3 \times 3$  的窗口基本一致, 因此选择  $5 \times 5$  的窗口也能够进行运动的检测。对星图目标而言, 考虑到运动目标往往较小,  $3 \times 3$  大小的窗口既能够完成目标的检测, 同时具有较高的效率。

本文利用滑动基本数据窗口对整幅图进行处理, 结果如图 8(a)所示, 为了验证本文算法的有效性, 本文分别采用传统帧间差分法, 改进的帧间差分法<sup>[15]</sup>和交叉投影算法<sup>[17]</sup>与该算法进行了试验对比, 结果如图 8(b)–图 8(d)所示。其中红色区域是提取的目标轨迹, 黄色区域为虚警轨迹。可以看出, 本文算法可以有效提取运动点目标轨迹, 虽然有些背景恒星虚警, 但都是独立恒星点, 通过轨迹分析手段可以去除。传统帧间差分算法和改进的帧间差分算法虽然可以提取目标运动轨迹, 但具有较多虚警, 图中黄色椭圆即是虚警轨迹。交叉投影算法能够去除较多的恒星虚警, 但同时也会有一定的漏检, 如图中黄色矩形框所示, 与张春华等人<sup>[17]</sup>研究结论一致。

为了更客观地评价实验结果, 定量分析空间运

动点目标检测算法的性能, 本文采用以下两个指标: 检测概率与虚警率, 具体计算方式如下: 用  $k_i$  表示目标  $i$  出现在被检测的轨迹上的个数, 本文通过给出的运动点目标速度估计模型即可得出  $k_i$ ,  $n_i$  表示目标  $i$  实际存在的帧数,  $l_i$  表示虚假轨迹长度,  $\sum l$  表示检测出的所有轨迹长度, 则检测概率  $p_f = k_i / n_i$ , 虚警率  $p_d = l_i / \sum l$ 。

为研究不同信噪比条件下 4 种算法的目标检测效果, 该文对添加不同强度噪声的仿真星图进行试验分析, 统计结果如图 9 所示。从图中可以看出, 就检测概率而言(图 9(a)), 本文算法在各个信噪比下都优于其他 3 种对比算法, 尤其是当信噪比  $\text{SNR} = 2$  时, 本文方法具有较大优势, 说明本文算法对噪声具有一定鲁棒性。从虚警率结果中(图 9(b))可以看出, 就虚警率而言, 交叉投影方法、本文方法、改进帧间差分方法以及传统帧间差分方法虚警率依次增高。交叉投影方法获得最优的虚警率, 但从检测概率图以及图 8 可以看出, 交叉投影方法虽然能有效地降低虚警, 但同时也具有较低检测概率。本文方法在控制虚警率的同时, 获得了最高的检测概率。

## 5 结束语

本文针对复杂星空背景, 提出了新的运动点目标描述模型; 通过分析运动点目标时域空域统计相

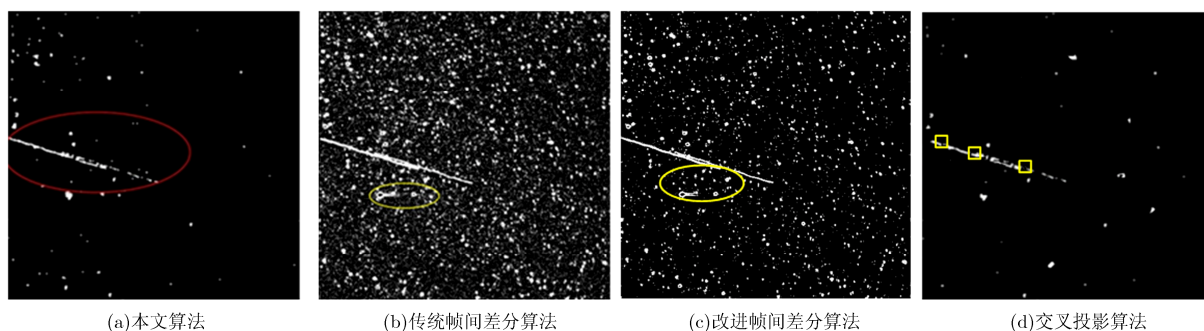


图8 运动轨迹提取

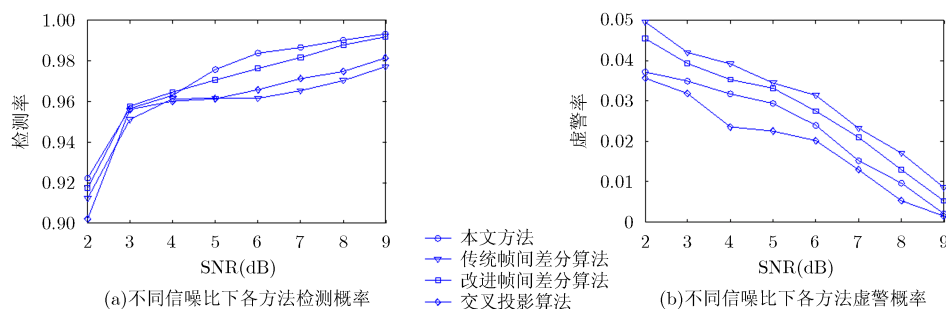


图9 不同信噪比下检测概率和虚警率对比结果

关的特性,采用相关性系数和相关矩阵方差两个参数对运动点目标轨迹进行了提取和识别。文中使用了实际拍摄的空间点目标运动视频进行实验,结果表明,该方法具有以下优点:(1)能够有效地同时实现多个运动速度,方向各不相同的低信噪比弱小目标运动轨迹的检测,并保持较低的序列虚警率。(2)该方法不需要目标与背景有能量差作为目标探测的前提。弱目标、暗背景条件下,目标和背景能量接近,若采用能量差的方法,虚警率高,而本文方法引入相关性系数克服了传统缺陷。但是本文算法依然存在一定不足之处,下一步将对时序信号长度的选取给出数学模型。

### 参考文献

- [1] 吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨迹和探测[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 1-8.
- [2] 孙挺, 齐迎春, 耿国华. 基于帧间差分法和背景差分的运动目标检测算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(4): 1325-1329. doi: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201604044.
- [3] 江汉红, 熊玮佳, 李庆. 一种基于 GMM 的目标检测改进算法[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3): 132-135. doi: 10.3963/j.issn.1671-4431.2013.03.027.
- [4] PICCARDI M. Background subtraction techniques: A review [C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Sydney, Australia, 2004: 3099-3104. doi: 10.1109/ICSMC.2004.1400815.
- [5] VALLEJO D, ALBUSAC J, and JIMENEZ L. A cognitive surveillance system for detection incorrect traffic behaviors[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(7): 10503-10511. doi: 10.1016/j.eswa.2009.01.034.
- [6] SENET T, EISELEIN V, and PATZOLD M. Efficient real-time local optical flow estimation by means of integral projections[C]. International Conference on Image Processing (ICIP 2011), Brussel, 2011: 2393-2396. doi: 10.1109/ICIP.2011.6116111.
- [7] 肖军, 朱世鹏, 黄杭, 等. 基于光流法的运动目标检测与跟踪算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 770-774. doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.06.003.
- [8] KRAVCHONOK A. Detection of moving objects in video sequences by the computation of optical flow based on region growing[J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2011, 21(2): 283-286. doi: 10.1134/S1054661811020647.
- [9] 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. doi: 10.3788/OPE.20162402.0460.
- [10] 李淼, 龙云利, 李骏, 等. 采用多伯努利滤波器的过采样点目标检测前跟踪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3446-3455. doi: 10.3788/OPE.20152312.3446.
- [11] ZHENG D K, WANG S Y, and QIN X. A dynamic programming track-before-detect algorithm based on local linearization for non-Gaussian clutter background[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2016, 25(3): 583-590. doi: 10.1049/cie.

- 2016.05.027.
- [12] DAVEY S J, RUTTEN M G, and CHEUNG B. A comparison of detection performance for several track-before-detect algorithms[C]. Proceedings of the IEEE 2008 International Conference on Information Fusion, Cologne, Germany, 2008, 2008: 1-8. doi: 10.1155/2008/428036.
- [13] 李振伟, 张涛, 孙明国. 星空背景下空间目标的快速识别与精密跟踪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 589-599. doi: 10.3788/OPE.20152302.0589.
- LI Zhenwei, ZHANG Tao, and SUN Mingguo. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 589-599. doi: 10.3788/OPE.20152302.0589.
- [14] 张健, 娄树理, 任建存. 基于时序多帧投影的空间目标检测算法[J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 88-93. doi: 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.01.020.
- ZHANG Jian, LOU Shuli, and REN Jiancun. Space target detection algorithm based on sequential multi-frames projection[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(1): 88-93. doi: 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.01.020.
- [15] 王恩旺, 王恩达. 改进的帧差法在空间运动目标检测中的应用[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(3): 333-339. doi: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20160316.00.
- WANG Enwang and WANG Enda. Application of an improved frame difference method in space moving target detection[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2016, 13(3): 333-339. doi: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20160316.002.
- [16] 黄宗福, 汪金真, 陈曾平. 光电探测中空间目标和恒星目标运动特性分析[J]. 光电工程, 2012, 39(4): 67-72. doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2012.04.012.
- HUANG Zongfu, WANG Jinzhen, and CHEN Zengping. Motion characteristic analysis of space target and stellar target in opto-electronic observation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(4): 67-72. doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2012.04.012.
- [17] 张春华, 周晓东, 陈维真. 基于背景抑制的星空图像目标运动轨迹提取[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 143-146. doi: 10.3969/j.issn.1007-2276.2008.01.033.
- ZHANG Chunhua, ZHOU Xiaodong, and CHEN Weizhen. Target trace acquisition method of star images based on background elimination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 143-146. doi: 10.3969/j.issn.1007-2276.2008.01.033.
- 王 敏: 女, 1989 年生, 博士生, 研究方向为复杂背景下的空间目标自动识别、图像处理.
- 赵金字: 男, 1976 年生, 研究员, 硕士生导师, 主要从事地基空间目标探测设备软件设备、图像采集等方面的研究.
- 陈 涛: 男, 1965 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密跟踪测量技术的研究.
- 崔博川: 男, 1992 年生, 博士生, 研究方向为图像处理.