

基于规范化线性滤波器的漂移扫描恒星抑制

林建霖¹, 平西建¹, 马德宝^{1,2}

(1. 信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 武汉理工大学华夏学院, 湖北 武汉 430223)

摘要: 针对漂移扫描星图中大量恒星星像对小目标检测产生干扰的问题, 提出了一种自适应的线性滤波方法, 通过抑制恒星星像实现对小目标的检测。首先, 在分析恒星、感兴趣目标和噪声三者特征的基础上, 构造规范化线性滤波器对星图进行滤波, 扩大不同亮度恒星和小目标星像的灰度对比度, 并构造梯度线性滤波器自适应地抑制恒星星像。其次, 通过理论分析, 给出了滤波器参数的选择策略。最后, 比较不同方法对实际数据处理的实验结果, 表明所提方法对不同长度和倾斜角度的恒星星像都具有较好的抑制效果, 易于应用实现。

关键词: 信号处理; 小目标检测; 规范化线性滤波; 星像抑制; 漂移扫描

中图分类号: TP 751

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.02

Suppression of drift-scanning star based on standardized linear filter

LIN Jian-lin¹, PING Xi-jian¹, MA De-bao^{1,2}

(1. Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;

2. Huaxia College, Wuhan University of Technology, Wuhan 430223, China)

Abstract: A large number of stars in the drift-scanning star image interfere with the detection of small targets. An adaptive linear filtering method is proposed to achieve the small target detection by suppressing the stars. Firstly, the characteristics of three different representative objects, i. e., stars, interest targets and noise, in the star image are analyzed, then the standardized linear filter is constructed to filter the drift-scanning star image so as to achieve the gray value amplification of different stars with the reduction of small targets. Meantime, for the purpose of suppressing the stars adaptively, a gradient linear filter is constructed to modify the effect with the standardized linear filter. The residual processing between the original star image and final filtering result suppresses the drift-scanning stars. Secondly, theoretical analysis is done to give the filter parameter selection strategy. Finally, with the processing results of different methods on the real drift-scanning data, it is shown that the proposed method for suppressing stars with different lengths and lean angles has a better effect and easier application than the others.

Keywords: signal processing; small target detection; standardized linear filter; star image suppression; drift-scanning

0 引言

电荷耦合器 (charge couple device, CCD) 漂移扫描技术自 20 世纪 80 年代初提出后, 通过时延积分的方法对同一目标多次曝光, 在微光环境下也能输出一定信噪比的信号, 可以使地基光电望远镜系统获取的空间目标数据质量发生明显改善, 已经广泛应用在天文观测的研究中^[1-2]。鉴

于漂移扫描技术在光子积累效率上的优势及空间目标监测的应用需求, 世界多国陆续将 CCD 漂移扫描技术应用于卫星和空间碎片等空间人造目标的监测^[3]。漂移扫描星图即由此技术生成的观测输出图像数据。除噪声、空间背景和设备光电效应的非均衡影响因素外, 漂移扫描星图与传统凝视观测生成的图像数据显著不同之处在于: 运用漂移扫描技术对人造目标的光子进行时延积累时 (若不特殊说明,

本文中目标即指人造目标),漂移扫描星图中的恒星星像产生近直线的拖影。凝视观测星图中的目标检测方法一般通过多帧匹配构造掩膜帧的方式分离恒星与空间目标^[4-5],漂移扫描星图采用此方法进行处理所面临的情况主要有:①大小在 9 个像素以内的小目标^[6];②恒星与目标在观测中都发生移动,且沿恒星移动轨迹存在灰度大于目标灰度值的拖影;③同一视场观测的帧数较少。以上原因使得匹配后难以实现对恒星有效滤除,将留下大量的离散恒星像素点,对星图中小目标的检测形成干扰。若利用星图中恒星与目标之间所表现出来的星像差异,将二者的分离模型可视为点与线的分离,则单帧处理是另一种解决思路。

点线分离常用的方法有霍夫(Hough)变换法、图像还原法和形态学法等。利用 Hough 变换^[7]进行处理时,先通过设置分割门限,得到含有恒星、目标及小部分噪声的图像,将恒星直线拖影映射为参量空间中的点,并通过对参量空间中的峰值检测来实现图像中恒星像素点的检测和滤除。对低信噪比的星图处理,门限设置产生大量的离散恒星及噪声像素点影响了 Hough 变换的处理性能。利用图像还原法^[8-9]进行处理时,将恒星拖影看成为由于运动产生的动态模糊,先构造线性模糊函数,通过解模糊来实现对恒星能量的积累,再分割出恒星,对分离后的恒星重新扩散并与原星图进行残差处理实现恒星的滤除。由于噪声的存在,解模糊非线性可逆,重新扩散后的恒星与原形状出现不完整匹配造成了大量虚假目标的存在。利用数学形态学法^[10]进行处理时,通过构造结构元匹配恒星直线拖影,进行开运算得到恒星直线的拖影区域,再通过残差处理实现恒星的滤除。但是形态学法对结构元的要求较高,当恒星拖影中存在间断点或结构元与直线拖影角度匹配有偏差时,开运算影响到恒星拖影区域的提取。

线性滤波是理论和实践结果的主要基础,在图像处理中特别重要^[11],本文在分析恒星直线星像特征的基础上,提出了一种自适应的线性滤波方法,通过抑制恒星星像来实现对小目标的检测。对于小目标检测,单帧处理较难以直接实现对目标的检测,但是通过良好的单帧预处理,能为多帧时空域处理方法提供较优的候选目标点,提高目标检测的判决效率。

1 恒星星像模型分析

在实际观测过程中,为了提高目标的定位精度,一般通过光学系统散焦^[12],使星像能量分布近似为二维高斯状,将目标能量分散到多个像素范围内,通过质心定位算法以期获得目标的亚像素坐标。对空间目标漂移扫描观测时,CCD 中电荷移动速度,要远大于恒星的移动速度,使得星图中的恒星星像产生近似为直线的拖影^[13]。实际星图中截取的恒星星像放大如图 1 所示,图中 H 表示水平轴向, V

表示垂直轴向,由图 1 可以直观地看出星像的能量分布特征,通过对恒星星像建模分析,有助于对星像的理解和处理。

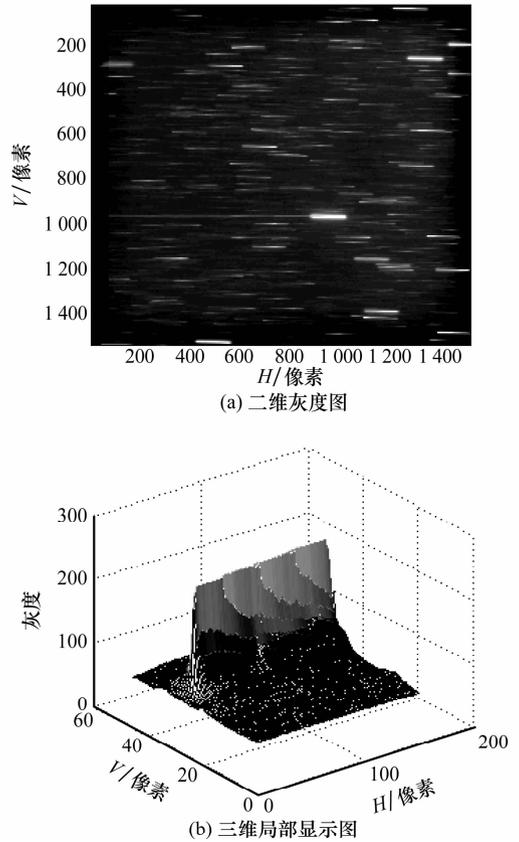


图 1 恒星星像图

星图中的恒星和目标星像,形状上表现的主要区别在于目标不产生直线拖影。因此,为简化处理,只对恒星星像沿直线剖面建模,若不特别说明,本文中 X 轴即为恒星星像的拖影方向轴。假定星图中散焦函数服从高斯分布,即

$$psf(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中, A 为恒星中心灰度值; σ 反映能量的扩散程度。若星像产生的直线拖影长度为 M 个像素点,令拖影函数为 $h(x) = 1, 0 \leq x \leq M$,则恒星星像可表示为

$$s(x) = psf(x) * h(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^M e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\mu \quad (2)$$

令 $t = \frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}$,则星像沿拖影向剖面模型表示为

$$s(x) = \frac{A}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}}^{\frac{M-x}{\sqrt{2}\sigma}} e^{-t^2} dt = \frac{A}{\sqrt{\pi}} \left(\int_{-\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}}^0 e^{-t^2} dt + \int_0^{\frac{M-x}{\sqrt{2}\sigma}} e^{-t^2} dt \right) = \frac{A}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{M-x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) \quad (3)$$

对 $s(x)$ 求一阶导,分析其值的线性变化情况,即有

$$s'(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(e^{-\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} - e^{-\left(\frac{M-x}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} \right) \quad (4)$$

由于 $\sigma \ll M$, 有 $s'(0) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}}$, $s'(M) \approx -\frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}}$, 且有

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} s'(x) = 0, \{x \mid x \neq 0, M\}$$

光学系统中的散焦参数 σ 一般很小, 由以上结论, 为便于实际的应用处理分析, 可将恒星星像模型近似为

$$s(x) = \begin{cases} \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}}, & 0 \leq x \leq M \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

2 规范化线性滤波器

星图中主要存在的 3 种不同信号: 斑点目标、近直线恒星拖影和随机噪声。由于小目标缺乏明显的形状信息, 灰度值与噪声表现得较为相似, 在进行滤波处理时可先将目标与噪声归为一类。设计的滤波器使得能有效地实现恒星的分离和抑制, 选择合适的参数来实现对目标能量的保留。

设计规范化线性滤波器的能量增益为 α , 沿恒星星像拖影方向的长度为奇数 L , 其离散形式可表示为

$$f(x) = \frac{\alpha}{L} \cdot \sum_{i=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} \delta(x-i) \quad (6)$$

满足 $\frac{1}{\alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$ 。

2.1 恒星星像的影响

采用规范化线性滤波器对恒星星像进行滤波的示意图, 如图 2 所示。图 2 中实大矩形框表示恒星星像的灰度分布, 实小矩形框表示规范化线性滤波器, 图 2 中虚线箭头表示积分方向。对滤波器与星像长度不同的两种情况分析如下。

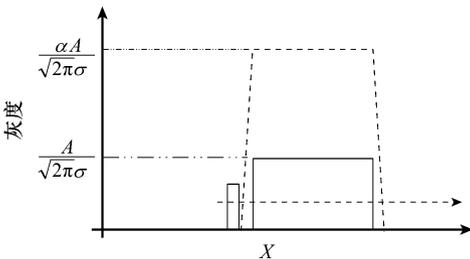


图 2 恒星星像滤波过程示意图

(1) $L-1 \leq M$

$$s_g(x) =$$

$$\begin{cases} \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \frac{\alpha}{L} \cdot \left(x + \frac{L-1}{2}\right), & \frac{L-1}{2} \leq x < \frac{L-1}{2} \\ \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \alpha, & \frac{L-1}{2} \leq x \leq M - \frac{L-1}{2} \\ \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \frac{\alpha}{L} \cdot \left(M - x + \frac{L-1}{2}\right), & M - \frac{L-1}{2} < x \leq M + \frac{L-1}{2} \end{cases} \quad (7)$$

(2) $L-1 > M$

$$s_g(x) =$$

$$\begin{cases} \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \frac{\alpha}{L} \cdot \left(x + \frac{L-1}{2}\right), & \frac{L-1}{2} \leq x \leq M - \frac{L-1}{2} \\ \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \frac{\alpha}{L} \cdot M, & M - \frac{L-1}{2} < x < \frac{L-1}{2} \\ \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \frac{\alpha}{L} \cdot \left(M - x + \frac{L-1}{2}\right), & \frac{L-1}{2} \leq x \leq M + \frac{L-1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

图 2 中虚梯形框是滤波结果 $s_g(x)$ 的示意, 结合式 (7) 及式 (8) 可见, 滤波后, ①当滤波器长度小于恒星星像长度时, 星像中部灰度为恒定值, 且只跟增益有关, 而与滤波器长度无关; ②若线性滤波器的 L 越长, 卷积后影响的区域越长, 将对恒星星像邻域信号造成影响; ③两种情况下, 星像前后沿的斜率都保持一致, 并随着 L 的增加将变缓, 影响了原本信号的轨迹特征。因此, 在加大对恒星星像的影响时, 尽量在滤波器的控制长度下提高增益来实现。要使得经过与原星像的差分处理后, 恒星能量被抑制, 增益的选择至少应保证

$$\frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) < 0 \quad (9)$$

2.2 目标星像的影响

星图中的小目标同样经过光学系统后得到扩散, 其大小一般由几个像素点组成, 但受噪声影响, 类高斯分布的形状表现不明显, 如图 3 所示。

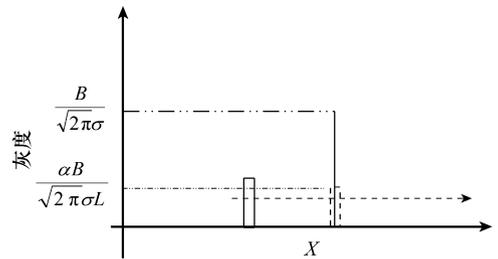


图 3 目标星像滤波过程示意图

示意图中的实冲激信号表示为目标星像, 与线性滤波器进行卷积后, 近似为图 3 中虚小矩形框。若目标原灰度值为 $B/\sqrt{2\pi\sigma}$, 滤波后对应原位置处的灰度值为 $\alpha B/\sqrt{2\pi\sigma}L$, 与恒星星像处理后的灰度变化相比, 目标灰度变化不仅与滤波器的能量增益有关, 而且同滤波器的长度 L 相关。差分处理后其目标位置点灰度为

$$\frac{B}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{L}\right) \quad (10)$$

由式 (10) 可见, 要使得目标能量能得到较大的保留, 需要尽可能增加滤波器的长度 L 。

2.3 噪声的影响和处理

利用规范化的线性滤波器对噪声进行处理, 实际上是

对噪声带有增益为 α 的平滑操作。若不设定门限对噪声进行处理,再与原图做差分,则噪声的方差将变大,影响到对目标的检测。因此,可以通过设定一个合适的门限,使得噪声分布基本上控制在某个门限附近,提高目标的信噪比。

星图中噪声 N 一般满足服从均值为 μ , 标准差为 σ_n 的独立同分布条件^[9], 假设某点位置处噪声的灰度为 C , 设定分割的门限为 G_n , 则经过处理后其灰度值为

$$C - \frac{\alpha}{L} \cdot \sum_{i=-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}-1} N_i \leq C - \frac{\alpha}{L} \cdot L \cdot p(N_i > G_n) \cdot G_n =$$

$$C - \alpha \cdot G_n \cdot \int_{G_n}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{(N_i-\mu)^2}{2\sigma_n^2}} dN_i =$$

$$C - \alpha \cdot G_n \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{G_n - \mu}{\sqrt{2}\sigma_n} \right) \quad (11)$$

G_n 根据以下条件选择: C 经过差分处理后灰度小于 G_n , 即

$$C - \alpha \cdot G_n \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{G_n - \mu}{\sqrt{2}\sigma_n} \right) \leq G_n \quad (12)$$

令 $C = \mu + \sigma_n$, 求解满足式(12)的最小值作为对噪声的分割门限 G_n 。

综合以上规范化线性滤波对 3 类不同信号的影响,对规范化滤波器的参数选择可以得出以下结论:①首先要确定增益 α , 使得保证恒星星像能够被滤除, 其原则可由式(9)来确定, 选择满足式(9)的最小值;②其次, 在 α 的基础上确定 L , L 越大则目标能量保留越多, 但恒星星像的影响范围越广, 选择合适的 L 是关键;③最后确定 G_n , 对所要处理的星图进行分割。

3 梯度线性滤波器

由第 2 节的分析可知, 滤波器长度的选择存在矛盾。在本节中构造梯度线性滤波器, 通过减少恒星星像经过规范化滤波的影响范围来适当调整。

减少影响范围的一种方法可通过对其范围的截断来实现, 如图 4 所示, 确定前后沿门限 G , 使之满足

$$s_i(x) = \begin{cases} s_g(x), & s_g(x) \geq G \\ \alpha \cdot G_n \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{G_n - \mu}{\sqrt{2}\sigma_n} \right), & s_g(x) < G \end{cases} \quad (13)$$

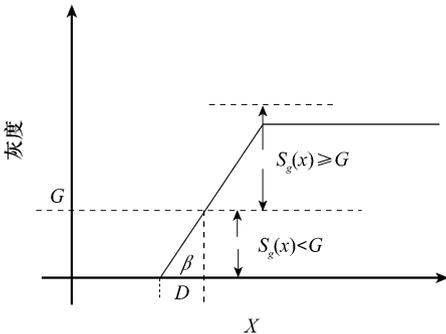


图 4 恒星星像滤波边缘示意图

对于同一恒星的星像, 其前后沿线性化后的斜率为常数, 见式(7)和式(8)。如图 4 所示, 截断范围 D 与门限存在以下关系:

$$G = D \cdot \tan \beta = D \cdot \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \frac{\alpha}{L} \quad (14)$$

由式(14)知, 对星图中不同的恒星星像, 门限与其本身的灰度值相关。需要构造梯度线性滤波器来计算式(14), 自适应地制定门限进行判决。梯度线性滤波器设计如下:

$$g(x) = \left[\sum_{i=-\frac{D-1}{2}}^{-1} \delta(x-i) - \sum_{i=1}^{\frac{D-1}{2}} \delta(x-i) \right] \cdot \frac{4}{D-1} \quad (15)$$

式(14)中 D 取奇数, 梯度线性滤波器与 $s_g(x)$ 进行卷积并取绝对值, 得到 $s_g(x)$ 中各点对应的判决门限, 如图 4 所示。恒星星像中部的门限 $G \approx 0$, 不会被截断。

综合以上各个环节, 本文所提漂移扫描星图中通过抑制恒星星像来实现小目标检测的主要步骤如下:

步骤 1 星图预处理。抑制星图缓变背景, 并统计噪声的均值 μ 和标准差 σ_n 。

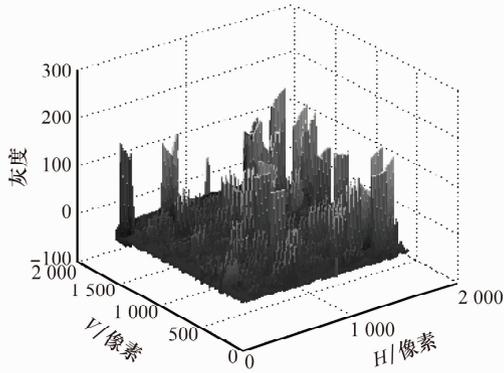
步骤 2 线性滤波器构造。根据设备控制参数或图像统计, 计算星图中恒星直线拖影方向 θ 。根据星像变化情况选择 α , 一般令 $\alpha=3, L=10 \cdot \alpha$, 由式(6)构造规范化线性滤波器并依 θ 旋转; 选择调整幅度 D , 由式(15)构造梯度线性滤波器并依 θ 旋转。

步骤 3 星图分割和滤波。由式(12)计算分割门限 G_n , 得星图 I , 利用规范化线性滤波器对 I 进行滤波得 I_g 。利用梯度线性滤波器对 I_g 进行调整, 得 I_r 。

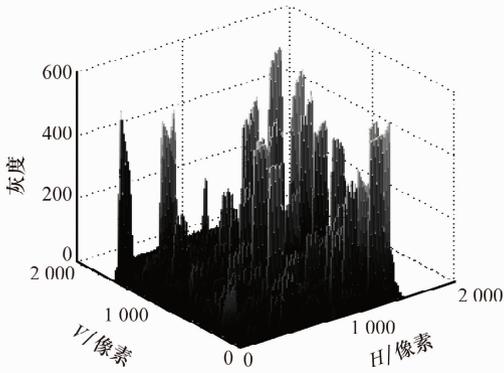
步骤 4 残差与恒星抑制。将星图 I 与滤波结果 I_r 差分, 实现恒星抑制。

4 实验结果与分析

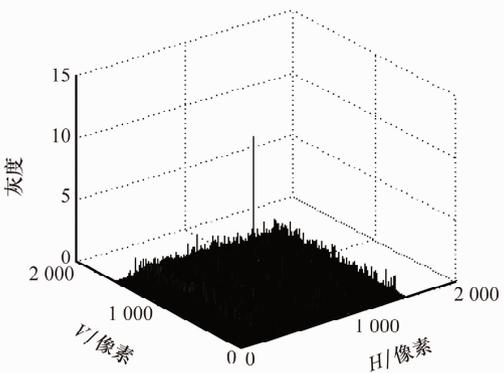
本文的实验环境为: Dual-Core, 3.2 GHz, 2 GB 内存 PC 机, 编程环境为 Matlab 7.0。对实际观测采集的大小均为 1528×1528 的漂移扫描数据进行处理。采用本文所提出方法处理星图的部分环节结果如图 5 所示, 图 5(a) 为经预处理后的星图, 图中恒星直线拖影在 140 个像素点左右, 方向为偏 H 轴 178° , 以逆时针方向为正。噪声服从均值为 -1.75 , 方差为 19.35 的高斯分布。由图 5(a) 中可知, 星图中存在大量不同灰度的恒星星像, 对淹没其中的目标检测产生严重干扰。所选择的滤波器参数为 $\alpha=3, L=30$ 像素, $\theta=178^\circ, D=10$ 像素, 滤波后得如图 5(b) 所示, 通过线性滤波, 自适应地将恒星星像灰度值放大, 并与图 5(a) 作残差, 抑制恒星星像, 保留目标与部分噪声, 得如图 5(c) 所示结果。



(a) 预处理结果图



(b) 滤波结果图



(c) 残差图

图 5 本文方法实验结果图

对实际观测采集在一个视场内较具代表性的两组漂移扫描数据进行处理,如图 6 所示。

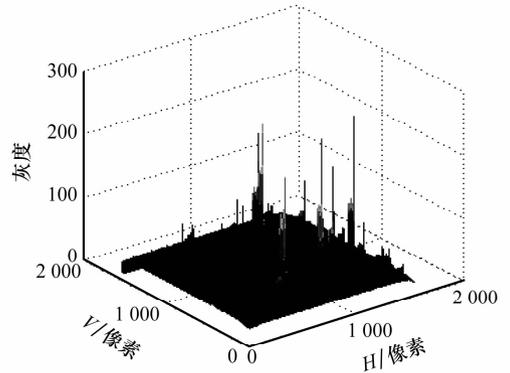
以候选目标个数、输出信噪比和输出量化级 3 个影响目标检测的指标及所耗时间来分析不同方法的处理性能,方法包括本文所提基于规范化线性滤波器的方法、形态学方法、基于最大期望(expectation maximization, EM)算法的图像还原方法和 Hough 变换法。关于 3 个指标的定义如下:

(1) 候选目标个数

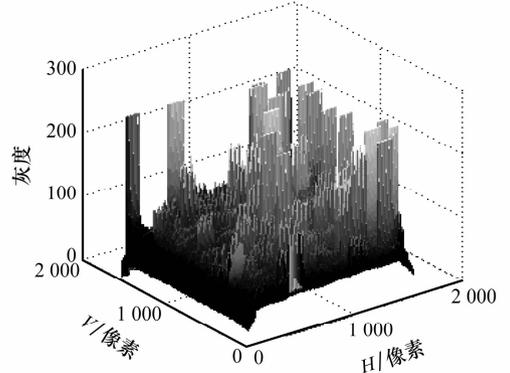
$$T_{num} = |\{I_i \mid I_i \geq \mu_i + 4\sigma_i\}|$$

(2) 输出信噪比

$$T_{snr} = (I_T - \mu_i) / \sigma_i$$



(a) 第一组



(b) 第二组

图 6 漂移扫描星图三维显示图

(3) 输出量化级

$$T_{qs} = (I_T - \min \{I_i\}) / (\max \{I_i\} - \min \{I_i\})$$

定义式中 I_i, μ_i, σ_i 和 I_T 分别表示输出图像的诸像素灰度值集、非零像素的均值和标准差及目标的灰度值。

第一组 7 幅:恒星拖影在 50 个像素点左右,方向为偏 H 轴 0° ,星像一端有突起,如图 6(a)所示。

由图 7 可以看出,本文所提方法对恒星星像抑制得较为彻底,产生的候选目标数平均在 25 个左右,如图 7(a)所示。在 4 种方法当中产生虚假目标数量最少,并且在这些候选目标中,真实目标的灰度值处在候选目标灰度量级 0~1 区间内的中上层,如图 7(c)所示,在 4 种方法中保持最高,增加了多帧目标能量积累的判决效率,为在少数数据帧里实现目标的多帧检测提供了较好的条件。根据本文所提规范化线性滤波器的机理和滤波器的参数设置,残差后目标自身能量的 0.1 左右将会被滤除掉,使得输出信噪比相比于其他方法有可能下降,如图 7(b)所示。形态学的逻辑运算规则对目标能量保留得较为完善,输出信噪比较高,但另一方面产生的候选目标个数也最多,平均为 2 500 个左右。EM 算法先还原再扩散,受噪声的影响,增加了结果的不可预测性,在某些帧里性能逼近本文所提方法,但整体性能变化较大。而 Hough 变换法对门限分割的要求较高,在高灰度恒星星像的影响下,已

经无法实现对目标的检测。

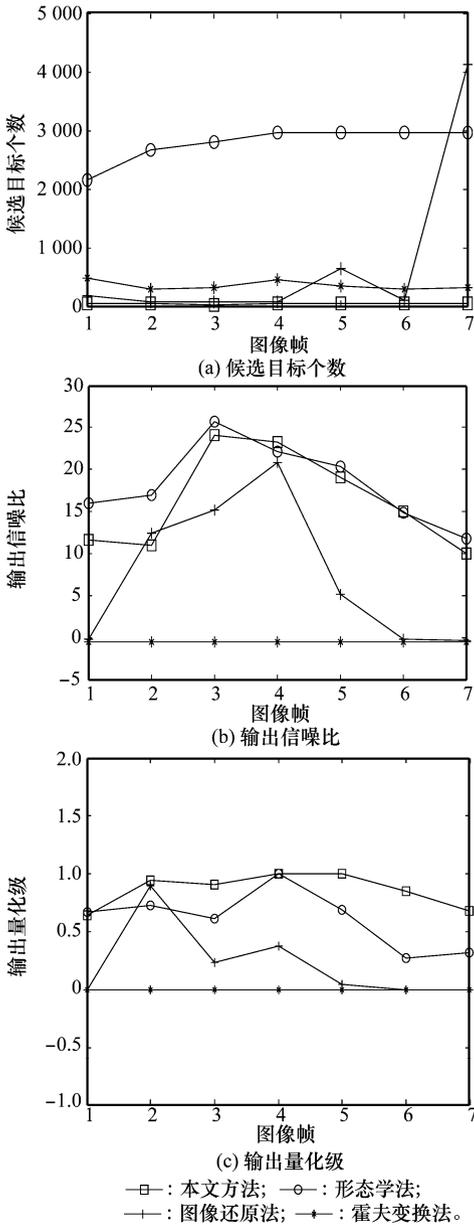


图 7 不同方法对第一组数据的处理结果比较

第二组 8 幅: 恒星拖影在 140 个像素点左右, 方向为偏 H 轴 178° , 星像灰度变化相对平稳, 如图 6(b) 所示。

由图 8 可以看出, 本文所提方法对恒星星像抑制仍较为彻底, 产生的候选目标数平均在 9 个左右, 如图 8(a) 所示, 真实目标的灰度值基本上处在候选目标灰度量化的顶层, 如图 8(c) 所示, 其输出信噪比的变化趋势也与目标在同一视场中的光度能量变化相一致, 如图 8(b) 所示。形态学方法在对第二组数据的处理性能上明显表现的不如对第一组数据的处理, 原因在于形态学的结构元设计比较敏感, 结构元与星图中星像由于量化问题存在不可避免的偏差便能影响形态学的性能, 基本上无法实现对恒星星

像的抑制。Hough 变换法仍然在统一的实验环境下失效。与对第一组的处理相似, EM 方法同样表现的不够稳定, 产生的候选目标个数平均为 150 个左右。同时, 4 种方法处理数据的平均耗费时间如表 1 所示。本文方法所涉及的基本运算为模板卷积和差分, 对基于矩阵操作的编程环境, 运算速度最快, 形态学和 Hough 变换的基本运算分别为基于像素点灰度的比较和映射操作, 运算速度其次, 基于 EM 算法的图像还原方法有非线性求逆操作, 使得所耗时最大。

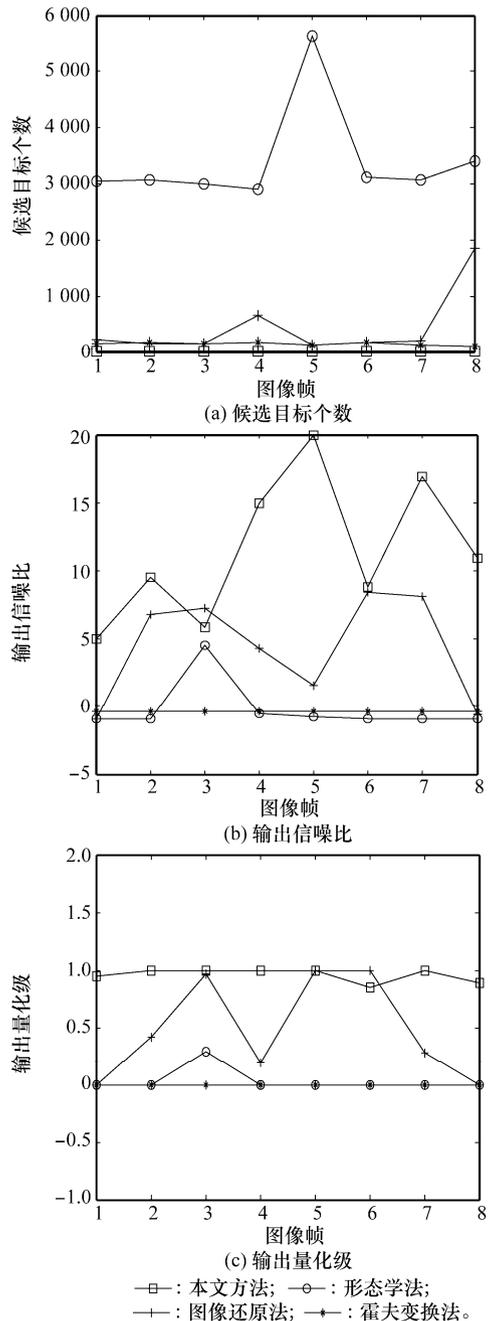


图 8 不同方法对第二组数据的处理结果比较

表 1 不同方法处理数据平均所耗时间 s

算法	平均耗时	
	第一组	第二组
形态学法	3.6	9.5
图像还原法	122.4	126.3
霍夫变换法	5.4	6.7
本文方法	1.1	1.1

5 结 论

本文从漂移扫描星图中抑制恒星星像实现目标检测的要求出发,提出了一种自适应的线性滤波方法,实现对恒星星像的抑制和小目标的保留。实际数据处理的实验结果表明,本文所提方法对不同长度和偏离角度的恒星星像都具有较好的抑制结果,使星图中小目标能保持较高的输出信噪比和量化级,而产生较少的候选目标数量和耗费较少的运算时间,易于工程的应用和实现,且要求的先验知识少,滤波器参数设置简单,对恒星拖影长度不敏感。同时,在实验中发现,目标信号在滤波后的变化幅度受滤波器长度变化的影响明显,寻找描述此规律的特征对目标加以区分是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] Sabbey C N, Coppi P, Oemler A. Data acquisition for a 16 CCD drift-scan survey[J]. *The Astronomical Society of the Pacific*, 1998,110(751):1067 - 1080.

[2] Fors O, Nunez J, Richichi A. CCD drift-scan imaging lunar occultations: a feasible approach for sub-meter class telescopes[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2001,378(3):1100 - 1106.

[3] 毛银盾,唐正宏,陶隽,等. 漂移扫描 CCD用于地球同步轨道卫星观测的初步结果[J]. *天文学报*, 2007,48(4):475 - 487. (Mao Y D, Tang Z H, Tao J, et al. Preliminary results of GSS's optical observation with CCD drift-scan mode[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2007,48(4):475 - 487.)

[4] 张健,周晓东,张春化. 空间目标运动轨迹提取算法研究[J].

红外技术, 2007, 29(8):459 - 462. (Zhang J, Zhou X D, Zhang C H. The research on the algorithm for space target motion trajectory extraction [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(8):459 - 462.)

[5] Sun J Q, Zhang Y N, Jiang L, et al. Small and dim target detection based on motion integration in visual attention model[C]// *Proc. of the 9th International Conference on Signal Processing*, 2008:1108 - 1111.

[6] Deshpande S D, Er M H, Ronda V. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C]// *Proc. of the Signal and Data Processing of Small Targets*, 1999:74 - 83.

[7] Du S Z, Wyk B J, Tu C L, et al. An improved hough transform neighborhood map for straight line segments[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2010,19(3):573 - 584.

[8] Lanteri H, Theys C. Restoration of astrophysical images: the case of poisson data with additive Gaussian noise[J]. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, 2005(15):2500 - 2513.

[9] Fransens R, Strecha C, Gool L V. Optical flow based super-resolution: a probabilistic approach[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007,106(1):106 - 115.

[10] Kumar J, Shunmugam M S. A new approach for filtering of surface profiles using morphological operations[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(3):260 - 270.

[11] Charalampidis D. Efficient directional Gaussian smoothers[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009,6(3):383 - 387.

[12] 张玉叶,王春歆. 基于改进 DPA 的空间小目标检测算法[J]. *电子学报*, 2010,38(3):558 - 560. (Zhang Y Y, Wang C X. Space small targets detection based on improved DPA[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010,38(3):558 - 560.)

[13] 马德宝,林建彝,陈东. 旋转式 CCD 漂移扫描观测的控制模型研究[J]. *光电工程*, 2009,36(10):35 - 38. (Ma D B, Lin J L, Cheng D. Model of drift-scan CCD's rotation control[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2009,36(10):35 - 38.)