

文章编号 1004-924X(2026)08-1189-14

## 空间目标白天光学探测中的散斑滤波方法

毕 寻, 王伟国, 陈 强\*, 张振东, 董全睿, 刘 阳, 刘廷霞  
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**地基光学望远镜在空间目标态势感知中发挥了重要作用。本文针对地基光学望远镜探测能力受天空背景辐射和大气湍流影响的问题提出了一种基于大气湍流特征的散斑滤波方法。首先,该方法对顺序存储的多帧图像进行累加计算,通过长积分时间获得较高信噪比的观测图像。然后,通过设置合适的提取阈值,配合连通域检测和连通域尺寸筛选,提取累加图像中的目标散斑。之后,根据累加图像中截取的散斑图案构造尺寸匹配且具备方向无关性的散斑滤波器。最后,利用散斑滤波器对最新获取的单帧观测图像进行空域滤波,并完成目标提取。实验结果表明:对于较强大气湍流和天空背景辐射条件下的暗弱空间目标观测,散斑滤波方法能够将地基望远镜探测能力提升 0.93 星等以上。散斑滤波方法具有构造简单、处理快速、鲁棒性强的特点,能够使地基光学望远镜在空间目标探测中发挥更好的作用。

**关键词:**地基光学望远镜;白天探测;大气湍流;散斑滤波;信噪比

中图分类号:TH691.9 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263408.1189 CSTR:32169.14.OPE.20263408.1189

## Speckle filtering method in daytime optical detection of space targets

BI Xun, WANG Weiguo, CHEN Qiang\*, ZHANG Zhendong, DONG Quanrui,  
LIU Yang, LIU Tingxia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: frog1224@sina.com

**Abstract:** Ground-based optical telescopes play an important role in space domain awareness. To address the degradation of detection capability caused by sky background radiation and atmospheric turbulence, this paper proposed a speckle filtering method based on atmospheric turbulence characteristics. First, the method performed cumulative summation on sequentially stored multi-frame images to obtain a high signal-to-noise ratio (SNR) observation image through long integration time. Then, target speckles could be extracted from the accumulated image, with an appropriate extraction threshold, combined with connected component detection and size-based filtering. Subsequently, a direction independence speckle filter with matching size was constructed based on the extracted speckle patterns from the accumulated image. Finally, the speckle filter was applied to the latest single-frame observation image for spatial-domain filtering, enabling effective target extraction. Experimental results show that for the observation of faint space tar-

收稿日期:2025-12-29;修订日期:2026-02-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12503089);吉林省科技发展计划项目(No. 20250602034RC)

gets under strong atmospheric turbulence and sky background radiation, the proposed speckle filtering method can improve the detection capability of ground-based telescopes by more than 0.93 magnitudes. The speckle filtering method is characterized by simple computation, fast processing and strong robustness, enabling ground-based optical telescopes to achieve better performance in space object detection.

**Key words:** ground-based optical telescope; daytime detection; atmospheric turbulence; speckle filtering; SNR

## 1 引言

近年来,随着可重复使用火箭技术、载荷小型化与模块化等关键技术的不断成熟,全球在轨空间目标数量呈现爆发式增长<sup>[1-3]</sup>。广播、通信、导航、资源与环境监测及气象观测等领域广泛部署的人造卫星,已成为推动国民经济发展、提升防灾减灾能力的重要支撑。在此背景下,构建空间目标态势感知体系,实现对在轨目标的持续监控,精准掌握其轨道状态,有效预警潜在碰撞风险,对于保障航天器运行安全、维护国家空间资产具有深远的战略价值。

空间目标监视主要分为地基和天基两种方式。其中,地基观测因建设灵活、性价比高而得到广泛应用。地基光学望远镜通过接收空间目标反射的太阳光进行观测,具备高精度获取轨道参数、姿态特征与结构信息的能力,可有效支持轨道维持、碰撞预警与辐射特性识别等任务。相较于大功率相控阵雷达,具有成本低、分辨率高、无源探测等优势,展现出广阔的应用前景<sup>[4-6]</sup>。

传统地基光学望远镜依赖夜间暗背景进行空间目标观测,每日有效观测窗口仅数小时。研究表明,在白天相同观测条件下短波红外波段相比可见光波段具有更低的天空背景亮度和相对较高的大气透过率,既可避免探测器饱和,又能获得更高信噪比的图像,有利于提升望远镜对暗弱目标的探测能力<sup>[7-9]</sup>。具备白天探测能力的地基光学望远镜,可在较高太阳仰角下持续监控空间目标,显著提升观测时效性与设备利用率<sup>[10-11]</sup>。

受地表稠密大气在温度、随机运动等方面的影响,地基光学望远镜收到空间目标成像光束的波前被大气湍流破坏,无法以设计的光学系统衍射极限分辨率进行观测,造成成像模糊和分辨率下降。弥散的目标能量使目标容易被起伏的背景噪声淹没,降低了地基光学望远镜对空间目标

的探测能力。通过自适应光学技术矫正大气湍流造成的波前畸变,能够改善成像效果,使成像能力恢复到接近衍射极限分辨率<sup>[12-13]</sup>。应用自适应光学技术需要在光学系统中增加波前传感器、变形镜、相应的控制器等机电单元,技术复杂且建造和维护成本高昂,因此主要应用于大口径地基光学望远镜。综上,面向低成本小型地基光学望远镜,探索高效提升白天探测能力的技术路径,具有重要意义。

## 2 大气对地基光学望远镜的影响

### 2.1 望远镜的探测能力

空间目标态势感知体系对在轨运行的合作空间目标和非合作空间目标保持精确跟踪,可测量生成对应目标的轨道根数。利用轨道根数和二体运动摄动模型(如SGP4简化普适摄动模型),可以计算对应任意给定时段内空间目标在地心惯性坐标系中位置和速度的轨道预报数据<sup>[14]</sup>。在空间目标观测中,地基光学望远镜首先根据站心坐标系变换后的轨道预报数据进行随动,保持光学成像轴线与空间目标同步运动,使空间目标在探测器上稳定成像。当从观测图像中成功提取空间目标成像信号后,望远镜完成对空间目标的探测。之后望远镜对空间目标保持稳定跟踪,同步记录图像、角度和角速度等遥测数据。

假设空间目标反射阳光的入瞳能量全部集中于地基光学望远镜焦面成像探测器的单个像元上,信号光电子数可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$S = \Phi_s \cdot A \cdot f_s \cdot q_s \cdot \tau_s \cdot t, \quad (1)$$

其中: $\Phi_s$ 为信号光子通量( $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $A$ 为望远镜通光口径面积( $\text{m}^2$ ); $f_s$ 为目标光谱透过率系数; $q_s$ 为探测器对目标光谱平均量子效率; $\tau_s$ 为光学系统对目标光谱的透过率; $t$ 为观测图像积分

时间( $s$ )。

天空背景辐射造成的探测器响应电子数为:

$$B = \Phi_b \cdot A \cdot f_b \cdot q_b \cdot \tau_b \cdot \alpha^2 \cdot t, \quad (2)$$

其中:  $\Phi_b$  为天空背景辐射光子通量 ( $m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot (")^{-2}$ );  $A$  为望远镜通光口径面积 ( $m^2$ );  $f_b$  为天空背景光谱透过率系数;  $q_b$  为探测器对天空背景光谱平均量子效率;  $\tau_b$  为光学系统对天空背景光谱的透过率,在窄带成像望远镜中与  $\tau_s$  相同;  $\alpha$  为成像探测器像元对应的空间立体角 ( $"$ ),  $\alpha = d/F$ ,  $d$  为成像探测器像元直径,  $F$  为光学系统焦距;  $t$  为观测图像积分时间 ( $s$ )。

在地基光学望远镜应用的成像探测器通常性能较高,受转移噪声、读出噪声和暗电流噪声等噪声影响较小,相比天空背景辐射产生的散粒噪声可以忽略<sup>[15]</sup>。只考虑天空背景辐射噪声影响的地基望远镜探测信噪比为:

$$SNR = \frac{S}{(B)^{1/2}} = \frac{\Phi_s \cdot f_s \cdot q_s \cdot (A \cdot \tau_s \cdot t)^{1/2}}{(\Phi_b \cdot f_b \cdot q_b \cdot \alpha^2)^{1/2}}. \quad (3)$$

观测图像中的目标信噪比较高时可有效提取出目标成像图案,完成对目标的探测。地基光学望远镜能够有效探测最暗弱目标的仪器星等,标志着其探测能力,是望远镜的关键指标之一。相同观测条件下,星等为  $m_1$  和  $m_2$  的空间目标对应的信号光子通量分别为  $\Phi_{s1}$  和  $\Phi_{s2}$ , 存在如式(4)所示的关系<sup>[15]</sup>:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 2.5 \log(\Phi_{s2} / \Phi_{s1}). \quad (4)$$

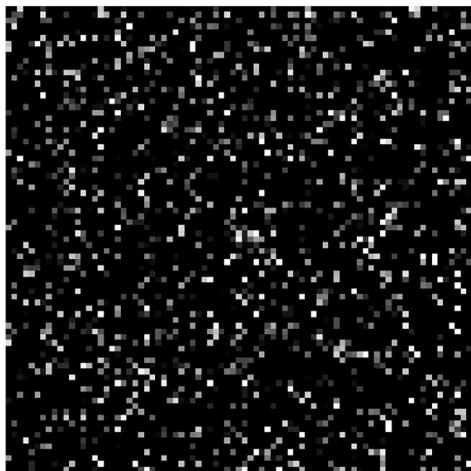
假设地基光学望远镜能够成功探测空间目标的成像信噪比阈值为  $SNR_2$ , 对应极限探测能力的空间目标的视亮度为  $m_2$ 。通过图像处理方法将目标成像信噪比提升到  $SNR_1 = l \cdot SNR_2$  时,相当于望远镜极限探测能力对应的目标信号光子通量降低了  $l = \Phi_{s2} / \Phi_{s1}$  倍。因此,望远镜获得的探测能力提升为:

$$\Delta m = 2.5 \log(l). \quad (5)$$

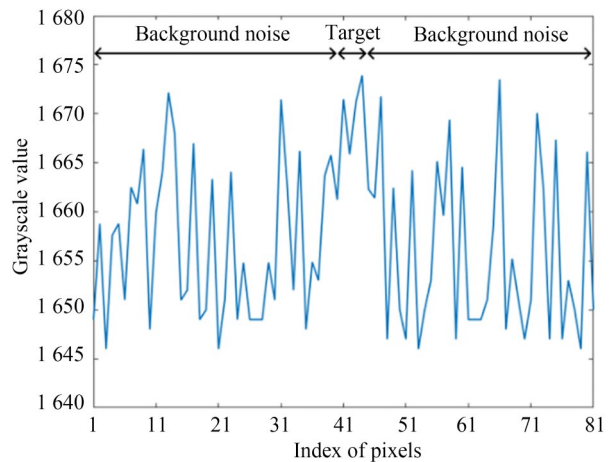
### 2.2 天空背景辐射的影响

阳光在大气中传播时,受大气分子、气溶胶及微小粒子的散射作用影响,使天空呈现蓝色或灰白色。这种散射产生的天空背景辐射强度显著高于空间目标反射阳光到达地面的信号强度,容易在望远镜内部形成杂散光影响成像效果,同时其随机波动形成的散粒噪声容易掩盖目标信号,降低了望远镜的探测能力。

针对杂散光问题,在地基光学望远镜的光学设计中均应用了消杂光技术,通过挡光环、光阑和涂覆消光漆等手段控制杂光的影响<sup>[15-16]</sup>。背景辐射造成的随机噪声起伏对望远镜探测能力的影响较难抑制,图 1 为地基光学望远镜在强天空背景辐射条件下对暗弱空间目标进行连续观测时,经过背景非线性校正、杂散光抑制、非均匀性校正<sup>[17]</sup>和直方图均衡化等预处理后获得的单帧观测数据。



(a) 单帧观测图像  
(a) Single-frame observation image



(b) 目标信号及背景噪声在x方向上的灰度值分布  
(b) Grayscale value of the target and background noise in x direction

图 1 强天空背景辐射下的暗弱空间目标观测数据

Fig. 1 Observation data of a faint space target under strong sky background radiation

图 1(a)单帧观测图像中,目标信号能量较低而背景随机噪声较大,目标被淹没在起伏的噪声中,真实目标的信噪比仅为 2.09。由于目标信号覆盖的像元数较少,将观测图像视为受噪声污染的均匀背景,计算图像的平均灰度值  $m=1\ 658.2$  和灰度值标准差  $std=6.3$ 。假设噪声符合高斯函数分布特性,选择提取阈值  $threshold=(m+k \cdot std)$ ,当  $k=2$  时背景噪声像元灰度超过该阈值的概率仅为 4.55%,因此灰度值高于阈值的像元有 95.45% 的概率属于观测目标。以阈值  $threshold=(m+2 \cdot std)=1\ 670.8$ ,对图 1(a)进行二值化后的图像如图 2(a)所示。暗弱空间目标所占像元数通常大于 2 个,对图 2(a)筛选连通域面积  $\geq 2$  个像元的区域得到图 2(b)。

目标成像产生的能量叠加在背景上,形成灰度值较高的“峰”,因此可以对各连通域计算信号能量,取能量最高的信号为目标并提取位置。根据图 1(a)中像元的灰度值计算图 2(b)中各个连通域对应的信号能量:

$$E_i = \sum_k (G_{i,k} - m), \quad (6)$$

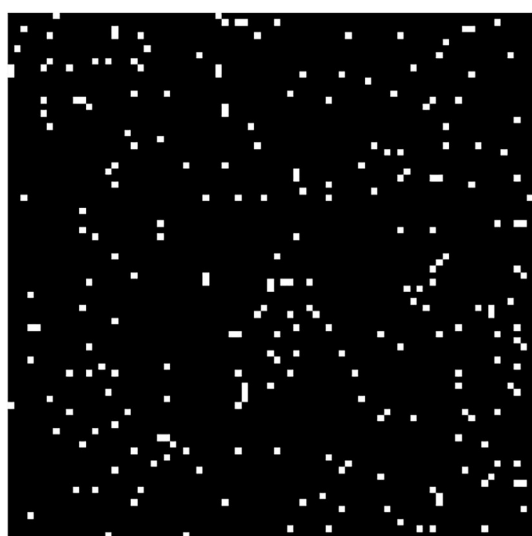
其中:  $E_i$  为编号为  $i$  的连通域对应的信号能量;  $G_{i,k}$  为编号为  $i$  的连通域内像元对应的观测图像灰度值;  $m$  为观测图像平均灰度值。

选取能量最高的连通域中心作为目标中心

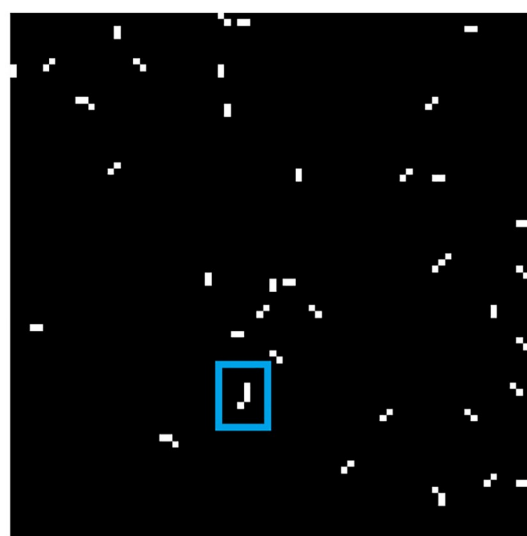
位置,完成目标提取。由于图 1(a)中真实目标信号较弱且背景噪声起伏较大,在上述提取目标过程中错误地将图 2(b)框线中的多个高灰度值背景噪声像元当作目标提取,造成了提取失败。

根据式(3),在观测条件相同且光学系统通光面积、探测器选型等关键光学参数确定后,信噪比与积分时间的平方根( $t^{1/2}$ )呈正相关,因此增加成像积分时间可有效提升地基望远镜对空间目标成像的信噪比。由于白天探测中天空背景亮度较高,单纯增加成像积分时间容易造成探测器饱和,因此在地基望远镜的设计与实际应用中通常结合光谱滤波与可调衰减片策略<sup>[15,18]</sup>,降低入射光强度以延长积分时间,使成像积分时间达到数十毫秒至数百毫秒,提升成像信噪比。

当天空背景辐射较强导致积分时间无法继续增加时,对连续获取的多帧图像进行叠加处理,等效于进一步增加积分时间,是提升信噪比的另一途径,在一些应用中有效提升了地基光学望远镜的探测能力<sup>[19-20]</sup>。依据式(3),理论上累加  $n$  帧图像可使信噪比提升至原始的  $n^{1/2}$  倍。但  $n$  的取值不宜过大:一方面,随着  $n$  的增加信噪比提升速度递减,继续累加图像的收益变低;另一方面,伺服抖动等原因造成的望远镜微小晃动以及探测器转移噪声、读出噪声和暗电流噪声的积累将制约信噪比继续提升。此外,大量图像累加会



(a) 单帧图像二值化  
(a) Binarization of the image



(b) 筛选连通域的图像  
(b) Image after connected domains filtering

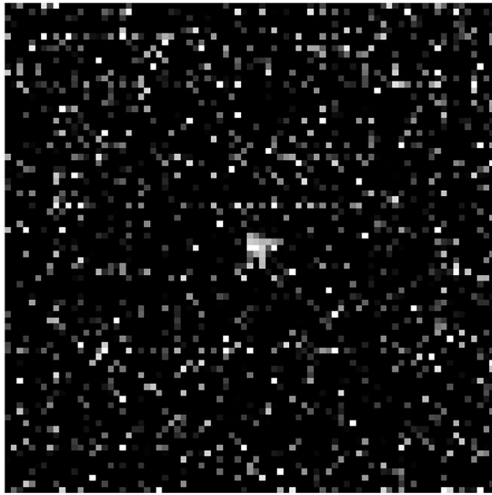
图 2 单帧观测图像的二值化与目标提取

Fig. 2 Binarization and target extraction of the single-frame image

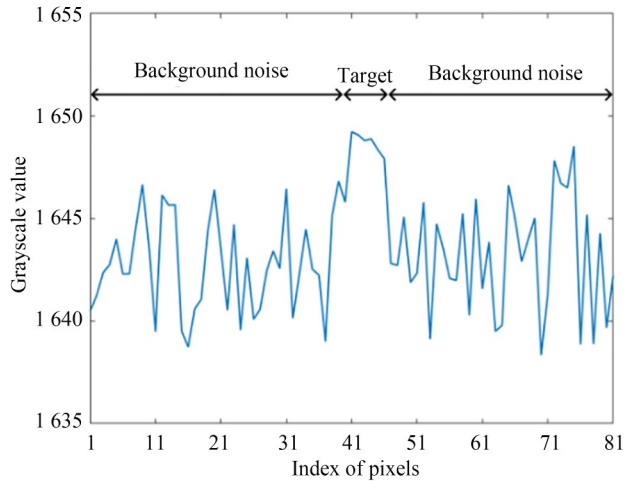
降低采集图像的更新速率,可能影响望远镜在高实时性要求的空间目标监测任务中的数据采集能力。

图 3 是对连续采集的 8 帧图像进行累加的结果,与图 1 相比,目标信号的对比度明显增强,而

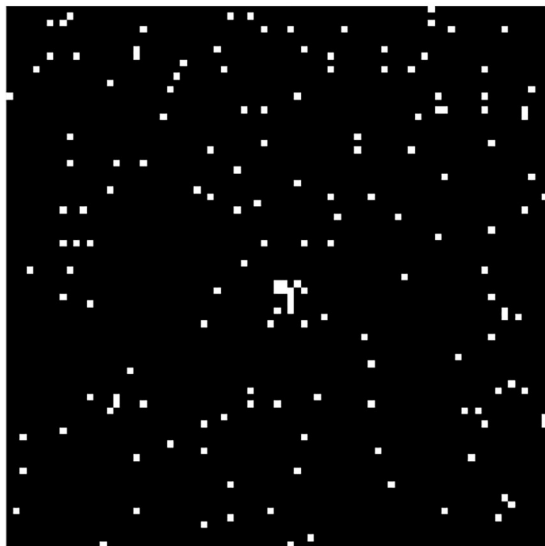
背景噪声强度明显下降,观测图像信噪比从 2.09 提升至 5.15。采用相同的处理方法,通过二值化并筛选连通域面积 $\geq 2$ 个像元的区域,可根据连通域信号能量准确提取目标(图 3(d)中的框线内)。



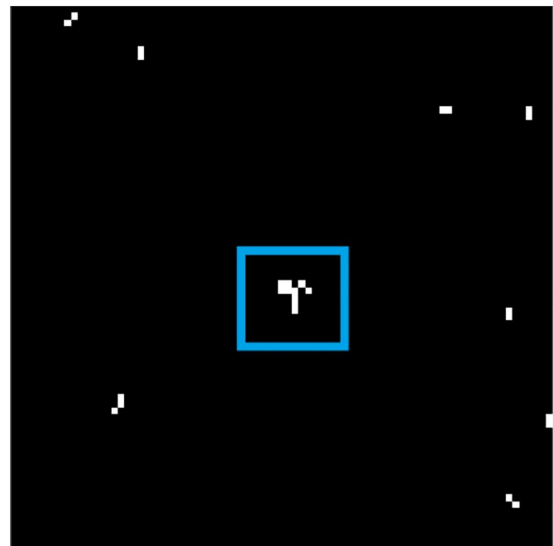
(a) 多帧累加(8帧)观测图像  
(a) Image of Multi-frame accumulation (8 frames)



(b) 目标信号及背景噪声在x方向上的灰度值分布  
(b) Grayscale value of the target and background noise in x direction



(c) 累加图像二值化  
(c) Binarization of the image



(d) 筛选连通域的图像  
(d) Image after connected domains filtering

图 3 多帧累加(8帧)观测数据

Fig. 3 Multi-frame accumulation (8 frames) of observation data

### 2.3 大气湍流的影响

在理想真空环境中,点光源经望远镜成像后,会形成具有特定能量分布的衍射图样,即艾

里斑(Airy disk)。目标成像的衍射极限角分辨率仅由望远镜口径和光学成像波长决定,根据瑞利判据(Rayleigh Criterion),衍射极限角 $\theta_{diff}$ 对应于

艾里斑中心主亮斑的角宽度,可通过公式(7)计算:

$$\theta_{\text{diff}} = 1.22 \cdot \lambda / D, \quad (7)$$

其中: $\lambda$ 为光学成像波长; $D$ 为望远镜口径。

地基望远镜受大气湍流干扰显著,当平面光波穿越大气时,大气因温度与密度分布不均产生折射率不规则起伏,引发波前的不同部分产生随机相位延迟。波前被“揉皱”后,点光源在像面处的能量分布发生畸变和破碎,形成不规则弥散和展宽的散斑图案。散斑图案削弱了目标成像的能量集中度,部分灰度值较低的像元被淹没在背景噪声中无法被识别为信号,造成了目标信号能量损失,成像信噪比下降,最终影响地基望远镜对空间目标的探测能力。

大气相干长度 $r_0$ 和相干时间 $\tau_0$ 分别描述了大气湍流导致的波前相位起伏变化的空间尺度和时间尺度。大气相干长度 $r_0$ 定义为当光波通过湍流大气后,其波前相位起伏的均方值达到1弧度时的横向空间距离。 $r_0$ 越小,表示湍流越强,成像受影响越大。大气相干时间 $\tau_0$ 定义为波前相位误差变化均方值为1弧度所需的时间。 $\tau_0$ 越小,表示光场的稳定性越差。基于Kolmogorov湍流统计模型(同时假设湍流外尺度无限大),大气相干长度 $r_0$ 和相干时间 $\tau_0$ 的关系如式(8)<sup>[21-22]</sup>:

$$\tau_0 \approx 0.314 \cdot r_0 / v, \quad (8)$$

其中: $v$ 为横向风速的加权平均值( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

在短波红外波段,较理想的观测条件下的大气相干时间典型值约为 $18 \text{ ms}$ <sup>[23]</sup>,这意味着长积分时间观测将不可避免地发生目标成像光斑的弥散展宽,造成望远镜探测能力下降。基于Kolmogorov湍流统计模型(同时假设湍流外尺度无限大,积分时间远大于 $\tau_0$ ),受大气湍流影响的散斑角度展宽 $\theta_{\text{seeing}}$ 通过如公式(9)计算:

$$\theta_{\text{seeing}} \approx 0.976 \cdot \lambda / r_0. \quad (9)$$

大气湍流造成的散斑能量分布是随机变化的,不存在解析解。文献[24]通过主成分分析对长曝光图像中的散斑分布按照高斯分布进行拟合,利用式(9)对 $r_0$ 进行近似估计,以表征大气湍流对成像的退化效应。

对于口径为 $0.5 \text{ m}$ 的地基望远镜,利用 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 的短波红外波段对空间目标探测,根据式(7)计算其衍射极限角为 $3.66 \mu\text{rad}$ 。而在该波段

大气相干长度为 $5 \text{ cm}$ 的较强湍流条件下,根据式(9)计算的散斑角度展宽为 $29.28 \mu\text{rad}$ ,显著大于衍射极限角。此时,模糊的散斑引起空间目标成像能量扩散,成像信噪比降低。依据式(3),图3中观测图像的积分时间是图1中观测图像的8倍,理论计算的信噪比提升应为 $8^{1/2} = 2.83$ 倍,而实际信噪比提升仅为 $5.15/2.09 = 2.46$ 倍。分析数据发现,图1中的目标信号宽度为4个像元,而图3中目标信号宽度为6个像元,正是目标信号能量的弥散造成部分成像能量损失,出现了实际观测数据中信噪比数据低于理论计算的情况。

### 3 观测图像分析

根据前文分析,大气对地基光学望远镜的白天观测主要带来两方面影响:(1)白天天空背景辐射产生起伏的散粒噪声;(2)大气湍流导致目标成像能量弥散,信号能量衰减。两方面影响均会造成观测图像的信噪比下降,望远镜探测能力退步。

采用图像滤波方法能够降低图像中的噪声影响,提升成像信噪比。常用的去除图像噪声处理方法包括均值滤波、高斯滤波、中值滤波、形态学滤波等<sup>[25-26]</sup>。

均值滤波利用平顶的均值滤波器对图像进行空域滤波,用一个像元及其邻域内所有像元灰度值的算术平均值替代该像元的原始值。 $3 \times 3$ 尺寸的均值滤波器为:

$$K = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

高斯滤波利用符合二维高斯分布函数的高斯滤波器对图像进行空域滤波。二维高斯分布函数为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (11)$$

其中: $\sigma$ 为标准差,决定了高斯分布函数的“宽度”和滤波的平滑程度。

中值滤波对每个像元及临近像元的灰度值进行排序,取中间值作为滤波结果。

形态学滤波基于膨胀运算和腐蚀运算。膨胀运算对每个像元及临近像元的灰度值进行排序,取最大值作为滤波结果;腐蚀运算对每个像

元及临近像元的灰度值进行排序,取最小值作为滤波结果。形态学滤波的开运算滤波是对图像先进行腐蚀运算再进行膨胀运算,形态学滤波的闭运算滤波是对图像先进行膨胀运算再进行腐

蚀运算。

分别使用均值滤波、高斯滤波、中值滤波、开运算滤波和闭运算滤波对图 1(a)进行图像处理,结果如图 4 所示,图像信噪比数据如表 1 所示。

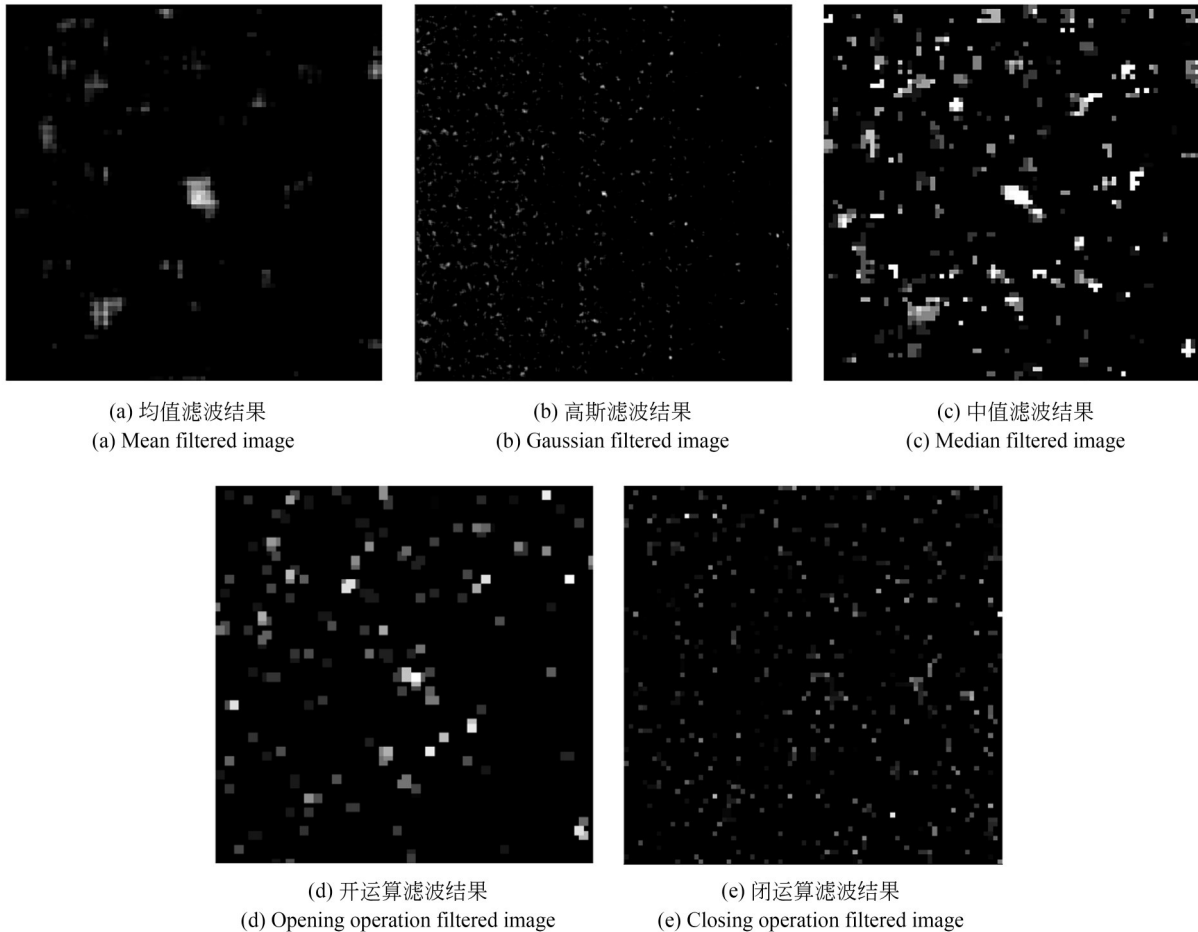


图 4 多种滤波处理结果的比较

Fig. 4 Comparison of different processes

表 1 多种滤波处理结果的信噪比数据

Tab. 1 SNR statistics of different processes

处理方法	信噪比	能否成功提取目标
初始图像	2.09	否
均值滤波	4.44	是
高斯滤波	4.64	是
中值滤波	3.07	是
开运算滤波	3.30	是
闭运算滤波	1.87	否

比较图 4 和表 1,可知:(1)均值滤波可以有效压制背景中的起伏噪声,同时能够将受大气影响而弥散的目标能量集中,有效提高信噪比;(2)

高斯滤波可以将目标能量高效汇聚,同时对背景噪声具有一定的压制作用,实现信噪比提升;(3)中值滤波虽能将目标信号增强,但对背景噪声的限制较弱,信噪比改善较小;(4)开运算滤波增强了目标能量,但压制背景噪声的能力不足,信噪比提升不大;(5)闭运算滤波中由于目标像元数很少,处理造成图像劣化,信噪比下降,无法正确提取目标。

综合以上分析,使用空间卷积滤波的均值滤波和高斯滤波方法,具有低通滤波特性,能够在限制天空背景辐射散粒噪声的同时,汇聚被大气湍流弥散的目标信号能量,克服了大气对观测图

像的部分影响,改善了地基光学望远镜对空间目标观测图像的信噪比。

#### 4 基于大气湍流特征的散斑滤波方法

经过分析,大气的影响是造成地基光学望远镜在白天观测空间目标中信噪比下降的主要源头,均值滤波和高斯滤波可以在一定程度上提升图像信噪比,相比中值滤波和形态学滤波取得了更好的效果。但均值滤波和高斯滤波中的滤波器参数主要依据经验确定,不能动态适应不同的大气观测条件,处理效果存在提升空间。对于高斯滤波,可参考文献[24]中的方法,通过二维高斯函数对标准差参数拟合,实现动态高斯滤波。然而,由于大气湍流导致的散斑能量分布具有随机性,拟合过程可能产生非实数的标准差参数,造成高斯滤波的效果变差。

由于短时间内的成像散斑描述了当前大气湍流弥散作用的特征,所以基于散斑设计空域滤波器可更具针对性地重构弥散的目标能量,提升观测图像的信噪比。本文提出了一种自适应空域滤波方法,基于大气湍流特征构造散斑滤波器,抑制大气对空间目标成像的退化影响。相比均值滤波和高斯滤波具有动态适应当前大气观测条件的特点。以图 1 和图 3 为例,该散斑滤波器的构建与滤波过程主要包括以下四个步骤。

##### 4.1 多帧图像累加

将输入的观测图像按时间顺序依次存储,并对最近的连续多帧图像执行累加操作(如图 3)。累加图像作为长积分时间的观测图像具有目标信噪比较高的特点,能够更准确地提取目标。同时,长积分时间的观测图像平滑了大气湍流对目标成像的随机弥散影响,获得的目标散斑能够相对准确地反映短时间内大气湍流对目标成像的弥散作用。累加帧数  $n$  的选择须综合单帧积分时间和大气相干时间确定,使总积分时间达到大气相干时间的 10 至 100 倍,可以削弱散斑随机变化带来的干扰。在短波红外波段观测空间目标时,大气相干时间一般不超过 30 ms。当单帧积分时间为 150 ms 时,取  $n=8$  可获得具有较高信噪比

的累加图像。

##### 4.2 提取散斑

在多帧累加图像中,由于信噪比较高,通过 2.2 节中的图像处理方法可以准确提取目标成像散斑。提取的散斑图案描述了短时间内大气湍流对成像能量分布造成的影响。

##### 4.3 构造散斑滤波器

假设大气湍流对当前时刻观测图像和累加图像的影响在统计特征上一致,可以利用多帧累加图像中的散斑图案构建空域滤波器,以校正实时图像中的弥散退化。考虑到大气湍流在时空上通常表现出各向同性的特点,构造的滤波器应具备方向无关性,即散斑滤波器距离中心距离相同的矩阵元素取值应相等。基于以上分析,构造自适应散斑滤波器的过程如下:

###### 4.3.1 计算散斑滤波器尺寸

为方便计算,将散斑滤波器设计为正方形,边长为  $L$  个像元。累加图像提取的散斑对应的像元数为  $N$ ,取  $L = 2 \cdot \text{floor}(N^{1/2})$ ,其中  $\text{floor}(\cdot)$  表示向下取整。

###### 4.3.2 确定散斑滤波器

在累加图像中以散斑重心位置为中心,截取边长为  $L$  个像元的正方形区域内散斑图案的灰度值矩阵,记为  $P_0$ (如图 5(a)所示)。基于  $P_0$  构造水平方向上对称的矩阵  $P_1$ ,其中  $\text{flip}(\cdot)$  代表将矩阵进行水平对称翻转:

$$P_1 = P_0 + \text{flip}(P_0). \quad (12)$$

基于  $P_1$  构造在任意  $90^\circ$  旋转方向上具有对称性的矩阵  $P_2$ ,其中  $\text{rot}90(\cdot)$  代表将矩阵顺时针旋转  $90^\circ$ ,  $\text{rot}180(\cdot)$  代表将矩阵顺时针旋转  $180^\circ$ ,  $\text{rot}270(\cdot)$  代表将矩阵顺时针旋转  $270^\circ$ :

$$P_2 = P_1 + \text{rot}90(P_1) + \text{rot}180(P_1) + \text{rot}270(P_1). \quad (13)$$

对  $P_2$  进行归一化处理,确保散斑滤波后的图像均值保持不变,完成散斑滤波器  $P$  的构造。其中  $p_{\text{sum}}$  为对  $P_2$  矩阵中全部元素的求和的结果。

$$P = P_2 / p_{\text{sum}}. \quad (14)$$

通过上述步骤构造的散斑滤波器  $P$ (如图 5(b)所示)具备各向同性的特点,能够有效表征短时间内目标成像的散斑能量分布。对单帧图像实施散斑滤波,可显著缓解大气湍流对目标能量集中度的干扰。散斑滤波器的构造过程仅涉及

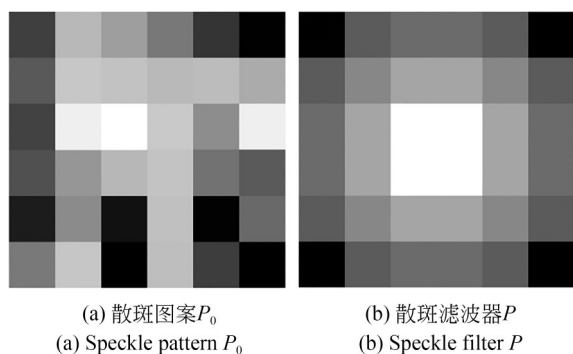


图 5 散斑滤波器的构造

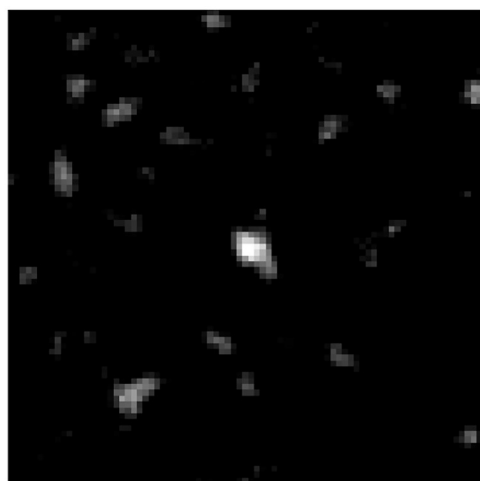
Fig. 5 Construction of the speckle filter

基础矩阵运算,无需高斯拟合,不仅简化了计算流程,提升了运算效率,也增强了算法的鲁棒性。

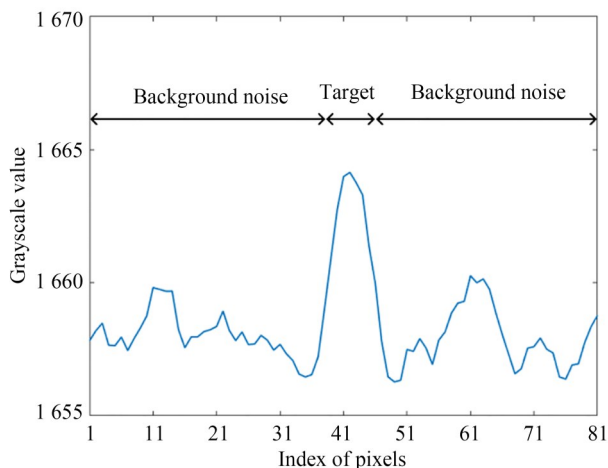
#### 4.4 对单帧图像进行滤波并提取目标

利用构造的散斑滤波器  $P$  对最新获取的单帧观测图像(图 1(a))进行空域滤波,滤波结果如图 6 所示。经散斑滤波后的图像可对观测目标完成准确提取。

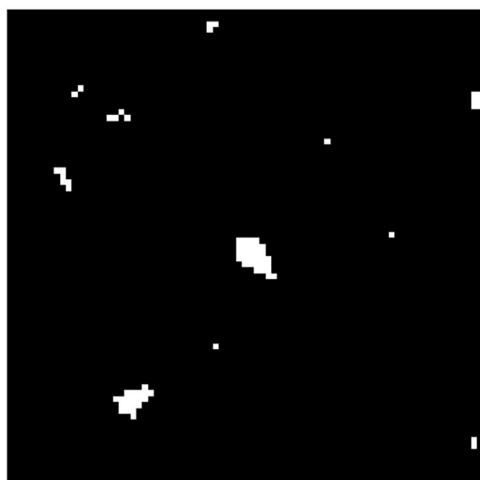
经散斑滤波处理后,天空背景噪声得到有效抑制,受大气湍流影响而弥散的目标成像能量被重新集中,目标信噪比相比单帧观测图像明显提高。与图 1 相比,图 6 中目标信噪比从 2.09 提升至 6.08,显著改善了目标的可辨识度,能够对目标进行准确提取,有利于提高地基光学望远镜的探测能力。



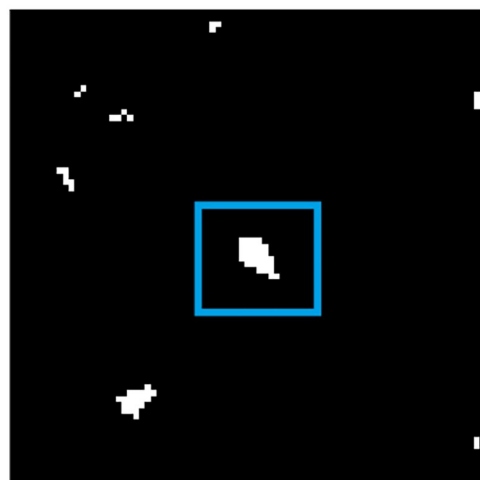
(a) 散斑滤波后的观测图像  
(a) Image after speckle filtering



(b) 目标信号及背景噪声在x方向上的灰度值分布  
(b) Grayscale value of the target and background noise in x direction



(c) 散斑滤波图像二值化  
(c) Binarization of the image



(d) 筛选连通域的图像  
(d) Image after connected domains filtering

图 6 散斑滤波结果

Fig. 6 Result of speckle filtering

## 5 实验数据处理与分析

为验证本文中散斑滤波方法的有效性,分别利用两次卫星观测实验获取的连续观测图像进行处理与分析。两次实验条件如表 2 所示。其

中,在乌鲁木齐进行观测的望远镜未应用光谱滤波技术,探测器容易发生饱和,成像积分时间受限。两次实验过程中,由于目标卫星亮度较低而背景噪声起伏较大,未进行图像滤波处理时很难稳定提取目标。

表 2 两次观测实验条件

Tab. 2 Conditions for two observation experiments

实验条件	实验 A	实验 B
时间	2019年6月15日	2025年4月17日
地点	新疆乌鲁木齐	吉林长春
通光口径/m	0.45	0.5
焦距/m	4	4.2
像元分辨率/arc sec	0.77	0.74
成像光谱	近红外+短波红外	短波红外
天空背景亮度/( $W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$ )	约 24	34.3~37.6
积分时间/ms	7.2	150
观测目标	LINGQIAO B 卫星	JILIN-1 10 卫星
图像帧数	40	48

天空背景亮度一般与大气条件、太阳夹角等因素相关,晴朗白天且太阳夹角大于  $30^\circ$  时,天空背景亮度通常小于  $15 W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$ 。实验 A 中天气晴朗,但观测目标与太阳夹角较小,天空背景亮度约  $24 W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$ ,观测目标卫星外形尺寸很小,亮度很低。实验 B 中大气湍流强烈且空气轻微污染,天空背景亮度为  $34.3 \sim 37.6 W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$ ,成功探测目标卫星的难度较大。两次实验均采集自地基光学望远镜长期观测中容易遇到的环境条件,代表了相对困难的观测场景。

为方便对比实验效果,在两次实验中均选择 8 帧图像进行累加以提取目标成像散斑。对实验 A 取连续图像中的前 7 帧图像作为先验数据,从第 8 帧开始利用单帧图像和连续存储的近 7 帧图像进行累加并提取目标成像散斑,按顺序对共 33 帧图像进行散斑滤波并计算目标信噪比。作为对比,同样从第 8 帧图像开始分别进行均值滤波和高斯滤波并计算目标信噪比。均值滤波器和高斯滤波器的尺寸与散斑滤波器相同,高斯滤波器的标准差参数根据散斑图案进行动态拟合。实验 A 中第 8 帧至第 40 帧图像进行不同处理后的目标信噪比曲线如图 7 所示,处理结果的统计

数据如表 3 所示。

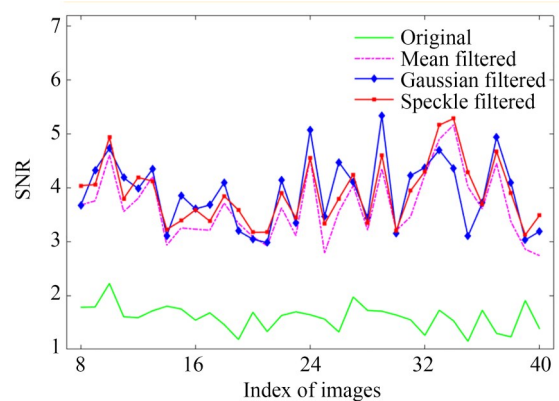


图 7 实验 A 观测图像的目标信噪比曲线

Fig. 7 SNR curve of continuous observation images in experiment A

表 3 实验 A 观测图像处理结果的统计数据

Tab. 3 Statistics of processing results in experiment A

处理方法	信噪比平均值	成功提取目标的帧数	成功提取目标的帧数占比
初始图像	1.60	9	27.27%
均值滤波	3.65	21	63.64%
高斯滤波	3.88	26	78.79%
散斑滤波	3.90	27	81.82%

根据实验 A 数据的统计结果,在共 33 帧图像中,初始图像中的目标信噪比平均值仅为 1.60,成功提取目标的帧数仅为 9 帧;使用均值滤波方法处理后,目标信噪比平均值提高到 3.65,成功提取目标的帧数为 21 帧;使用高斯滤波方法处理后,目标信噪比平均值提高到 3.88,成功提取目标的帧数为 26 帧;使用散斑滤波方法处理后,目标信噪比平均值提高到 3.90,成功提取目标的帧数为 27 帧。受散斑随机分布影响,在对第 35 帧图像进行高斯滤波时出现了拟合结果标准差为虚数的情况,进行高斯滤波后反而造成目标能量弥散,影响滤波效果。

使用相同方法对实验 B 获取的观测图像进行处理。第 8 帧至第 48 帧图像进行不同处理后的目标信噪比曲线如图 8 所示,处理结果的统计数据如表 4 所示。

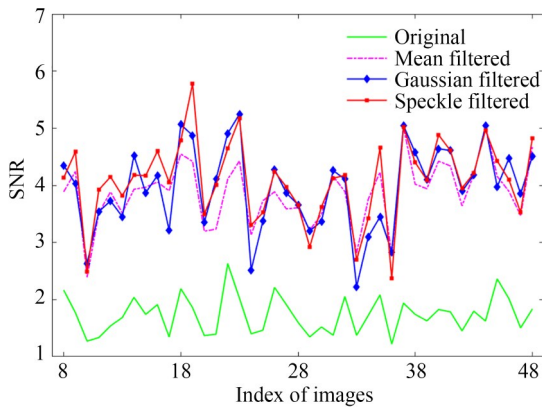


图 8 实验 B 观测图像的目标信噪比曲线

Fig. 8 SNR curve of continuous observation images in experiment B

表 4 实验 B 观测图像处理结果的统计数据

Tab. 4 Statistics of processing results in experiment B

处理方法	信噪比平均值	成功提取目标帧数	成功提取目标帧数占比
初始图像	1.73	18	43.90%
均值滤波	3.86	28	68.29%
高斯滤波	3.96	33	80.49%
散斑滤波	4.09	36	87.80%

实验 B 中受强烈大气湍流影响,初始图像的目标信噪比抖动较大。根据实验 B 数据的统计结果,在共 41 帧图像中,初始图像中的目标信噪

比平均值仅为 1.73,成功提取目标的帧数仅为 18 帧;使用均值滤波方法处理后,目标信噪比平均值提高到 3.86,成功提取目标的帧数为 28 帧;使用高斯滤波方法处理后,目标信噪比平均值提高到 3.96,成功提取目标的帧数为 33 帧;使用散斑滤波方法处理后,目标信噪比平均值提高到 4.09,成功提取目标的帧数为 36 帧。在实验 B 中对第 24 帧和第 45 帧图像进行高斯滤波时同样出现了拟合结果标准差为虚数的情况,造成滤波效果下降。

通过对比,两次实验中散斑滤波方法均取得了较好的效果,有效提高了成功提取目标的帧数,较为稳定地实现了对暗弱空间目标的提取。使用散斑滤波方法后,较强天空背景条件下暗弱目标的信噪比平均值分别提高到  $l_1=3.90/1.60=2.44$  倍和  $l_2=4.09/1.73=2.36$  倍。根据式(5),信噪比提高对应的探测能力提升分别为  $\Delta m_1=2.5\log(2.44)=0.97$  星等和  $\Delta m_2=2.5\log(2.36)=0.93$  星等。

在两次实验共 74 帧图像的滤波处理中,逐帧统计每种方法提升信噪比最高的次数,如表 5 所示。散斑滤波方法与高斯滤波方法在提高信噪比的性能上接近,都高于均值滤波方法。

表 5 不同处理方法提升信噪比能力统计

Tab. 5 Statistics on the ability of different processes in improving SNR

处理方法	提升信噪比最高的次数
均值滤波	5
高斯滤波	35
散斑滤波	34

对两次实验共 74 帧图像进行不同处理方法的用时进行统计,计算平均每帧处理时间,如表 6 所示。

均值滤波方法直接构造平顶空域滤波器,处

表 6 不同处理方法用时的统计数据

Tab. 6 Time consumption of different processes

处理方法	平均每帧处理时间/ms
均值滤波	2.11
高斯滤波	4.96
散斑滤波	3.38

理用时主要发生在空域滤波的卷积计算中,处理时间较短;高斯滤波方法中需要进行二维高斯函数的最小二乘拟合,计算标准差系数后构造高斯滤波器,处理时间较长;散斑滤波方法使用散斑图案进行简单的旋转和叠加计算构造散斑滤波器,处理时间适中。

综合以上实验结果和分析,散斑滤波与高斯滤波在提升信噪比能力和提高成功提取目标的帧数两方面的效果接近,都优于均值滤波。相比高斯滤波,散斑滤波具有构造简单、计算快速、鲁棒性强的特点。因此,在白天较强大气湍流和天空背景辐射条件下的空间目标光学探测中,散斑滤波方法能够快速有效地提升成像信噪比,增强地基望远镜对空间目标的探测能力。

## 6 结 论

本文根据地基望远镜对暗弱空间目标进行白天观测的需求,分析了天空背景辐射和大气湍流在观测中的影响。根据目标受大气影响在探测器处成像弥散的特点,提出了一种基于大气湍

流特征的散斑滤波方法,选取合适数量的多帧图像完成累加,利用累加图像中的散斑图案构造匹配大气湍流特征的散斑滤波器。经过多种滤波方法对实验数据处理结果的对比分析,表明该方法能够在白天较强大气湍流和天空背景辐射条件下,减少成像能量的弥散,抑制天空背景辐射噪声,有效提高观测图像中的成像信噪比,在白天暗弱空间目标观测中将地基望远镜的探测能力提升 0.93 星等以上。同时,散斑滤波方法相比高斯滤波具有构造简单、处理快速、鲁棒性强的特点,能够使地基光学望远镜在空间目标探测中发挥更好的作用。

### 作者贡献声明:

毕寻:方法论的提出,论文构思和撰写;

王伟国:实验指导和论文审核;

陈强:实验指导和论文撰写;

张振东:实验设计及数据整理和分析;

董全睿:争取实验条件和实验设计;

刘阳:实验数据分析;

刘廷霞:实验数据分析。

### 参考文献:

- [1] 肖武平. 2024 年全球航天发射统计分析[J]. 国际太空, 2025(2): 4-7.  
XIAO W P. Statistical analysis of global space launch in 2024[J]. *Space International*, 2025(2): 4-7. (in Chinese)
- [2] BAKER-MCEVILLY B, BHADARIA S, CANALES D, *et al.* A comprehensive review on Cis-lunar expansion and space domain awareness [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2024, 147: 101019.
- [3] GORDON N G, BENCHOUBANE N, KURT G K, *et al.* On the role of communications for space domain awareness [J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2025, 22(12): 1020-1031.
- [4] GALEANO D, PELTONIEMI J, ENRÍQUEZ-CALDERA R, *et al.* Inversion of the light curves of space debris using simulated satellite-based observations [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, 2946(1): 012001.
- [5] LIU S Q, HU S M, DU J J, *et al.* Space debris sky survey observation strategy based on HEALPix and greedy algorithm [J]. *Aerospace*, 2025, 12(3): 168.
- [6] HOLDSWORTH D A, SPARGO A J, REID I M, *et al.* Space domain awareness observations using the buckland park VHF radar [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(7): 1252.
- [7] 黄智国, 王建立, 王昊京, 等. 红外 K 波段白天探测能力分析验证 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 166-172.  
HUANG Z G, WANG J L, WANG H J, *et al.* Analysis and verification of infrared K band daytime detection ability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 166-172. (in Chinese)
- [8] 张艺, 胡健钊, 朱尤攀, 等. 短波红外成像系统设计及应用的研究进展 [J]. 红外技术, 2024, 46(3): 246-255.  
ZHANG Y, HU J C, ZHU Y P, *et al.* Research progress in the design and application of shortwave infrared imaging systems [J]. *Infrared Technology*, 2024, 46(3): 246-255. (in Chinese)

- [9] PAN N, WANG K P, DUAN M Y, *et al.* Infrared methods for daytime detection of space target [C]. *AOPC 2022: Optical Sensing, Imaging, and Display Technology*. December 18-20, 2022. Beijing, China. SPIE, 2023: 20.
- [10] PAUL-PHILIPP W. *Ground-based Autonomous Passive-Optical Staring Sensor for Orbital Object Detection and Position Measurement* [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2022.
- [11] ROSOK R, BARTELS N, RIEDE W, *et al.* Method for improving the positional accuracy in passive optical detection of space objects [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(18): 4964.
- [12] ZHANG L Q, RAO X J, BAO H, *et al.* Solar adaptive optics systems for the New Vacuum Solar Telescope at the Fuxian Lake Solar Observatory [J]. *Astronomical Techniques and Instrument*, 2024, 1: 1-10.
- [13] RAO C H, RAO X J, DU Z M, *et al.* EAST-educational adaptive-optics solar telescope [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2022, 22(6): 065003.
- [14] 王密, 陈俊博, 皮英冬, 等. 一种面向卫星在轨自主任务规划的快速精准轨道预报方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(6): 879-887.  
WANG M, CHEN J B, PI Y D, *et al.* A fast and accurate orbit prediction method for satellite on-orbit autonomous mission planning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 879-887. (in Chinese)
- [15] 王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2005.  
WANG W G. *Research of Space Object Detecting Under Bright Background* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [16] 张梓扬, 常军, 黄一帆, 等. 基于强化学习的空间引力波探测望远镜系统外杂光抑制研究[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230210.  
ZHANG Z Y, CHANG J, HUANG Y F, *et al.* Reinforcement learning-based stray light suppression study for space-based gravitational wave detection telescope system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(2): 230210. (in Chinese)
- [17] 陈松, 温宇鑫, 安浩铭. 基于多尺度双边滤波Retinex的非均匀光照散斑图像矫正[J]. *激光技术*, 2025, 49(1): 33-40.  
CHEN S, WEN Y X, AN H M. Non-uniform illumination speckle image correction based on multi-scale bilateral filtering Retinex [J]. *Laser Technology*, 2025, 49(1): 33-40. (in Chinese)
- [18] 曹雷. 低对比度目标探测跟踪技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
CAO L. *Research on Low-Contrast Target Detection and Tracking* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [19] DAI Y Q, ZHENG T, XUE C B, *et al.* Effective multi-frame optical detection algorithm for GEO space objects [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(9): 4610.
- [20] SUKURDEEP Y, NAVARRO F, BUDAVÁRI T. AstroClearNet: Deep image prior for multi-frame astronomical image restoration [J]. *Astronomy and Computing*, 2025, 53: 100999.
- [21] CANTALLOUBE F, FARLEY O J D, MILLI J, *et al.* Wind-driven halo in high-contrast images: I. Analysis of the focal-plane images of SPHERE [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 638: A98.
- [22] 艾则孜姑丽·阿不都克热木, 陶志炜, 刘世韦, 等. 大气湍流对接收光场时间相干特性的影响 [J]. *物理学报*, 2022, 71(23): 245-252.  
ABDIKIRIM AZIZIGUL, TAO Z W, LIU S W, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on temporal coherence characteristics of received optical field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(23): 245-252. (in Chinese)
- [23] CARBILLET M. Astronomical imaging. . atmospheric turbulence? adaptive optics! [J]. *EAS Publications Series*, 2013, 59: 59-76.
- [24] 胡钢, 向永源, 刘忠, 等. 基于系列斑点图像的视宁度估算精度方法研究 [J]. *天文研究与技术*, 2021, 18(2): 213-225.  
HU G, XIANG Y Y, LIU Z, *et al.* Seeing estimation accuracy study based on a sequence of speckle images [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2021, 18(2): 213-225. (in Chinese)
- [25] RAFAEL C G, RICHARD E W. *Digital Image Processing (4th ed.)* [M]. New York: Pearson,

2018.

- [26] 吴荣, 陆阳, 欧阳爱国. 正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(2): 435-443.

WU R, LU Y, OUYANG A G. A denoising method combining bitonic filtering and sine-cosine transform for shearography fringe pattern[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 435-443. (in Chinese)

#### 作者简介:



毕 寻(1976—),男,吉林省吉林市人,博士,副研究员,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,2012年于中国科学院研究生院获得硕士学位,2019年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光电跟踪设备的伺服控制技术研究。E-mail: bxiun2000@163.com

#### 通讯作者:



陈 强(1980—),男,吉林珲春人,硕士,高级工程师,2003年于东北师范大学获得学士学位,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要从事非线性光学技术研究。E-mail: frog1224@sina.com