

文章编号: 1002-1582(2025)05-0563-08

一种用于单光子计数成像探测器输出信号的降噪方法

贾楠, 付利平*, 王天放, 李睿智

- (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 天文与空间科学学院, 北京 101407)
(3. 北京天基空间环境探测重点实验室, 北京 100190)
(4. 空间环境态势感知科技重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 针对单光子计数成像探测器输出信号受噪声污染引起探测器的空间分辨下降的问题, 文章在传统小波阈值降噪算法的基础上增加了信号预处理环节, 进一步提升了探测器的降噪能力。仿真结果表明: 该算法的降噪性能相较传统小波阈值降噪算法的降噪性能至少提升了10%; 实验测试结果表明: 该算法可将探测器的空间分辨率由 $157\mu\text{m}$ 提升至 $125\mu\text{m}$ 。仿真测试及实验结果验证了本文提出算法的有效性。

关 键 词: 单光子计数成像探测器; 信号降噪; 小波阈值降噪算法; 空间分辨率
中图分类号: P352.7; **文献标识码:** B

A noise reduction method for the output signal of a single-photon counting imaging detector

JIA Nan, FU Liping*, WANG Tianfang, LI Ruizhi

- (1. National Space Science center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China)
(3. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China)
(4. Key Laboratory of Environment Space Situation Awareness, Beijing 100190, China)

Abstract: To address the issue of degraded spatial resolution in single-photon counting imaging detectors caused by noise-contaminated output signals, an enhanced denoising algorithm that incorporates signal preprocessing into the conventional wavelet threshold denoising method was proposed, thereby improving the detector's noise suppression capability. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm achieves at least 10% higher denoising performance compared with traditional wavelet threshold algorithms. Experimental verification shows that the detector's spatial resolution is improved from $157\mu\text{m}$ to $125\mu\text{m}$ through this method. Both simulation and experimental results confirm the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: single-photon counting imaging detectors; signal denoising; wavelet thresholding noise reduction algorithm; spatial resolution

0 引 言

空间探测计划向太阳系的火星、金星、木星

和小行星等深空探测领域进军。利用光学遥感对行星(包含行星的卫星, 如月球等)天体表面、大气、磁层等对象进行探测以获取科学目标信息,

收稿日期: 2025-05-12; 收到修改稿日期: 2025-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(42174226)

作者简介: 贾楠(1988—), 男, 工程师, 博士, 从事空间光学遥感研究。buxiugangtie@126.com

付利平(1972—), 女, 研究员, 博士, 从事空间物理研究。

* 通讯作者: fuliping@nssc.ac.cn

是研究太阳系起源与演化、地外生命探寻等问题的重要手段。上述行星待探测目标的特点在于光辐射弱、呈单光子状态,通常需要使用单光子计数成像探测器(下文简称探测器)才能对单光子量级的光辐射进行探测^[1-6]。利用探测器对单光子辐射进行探测时,探测器的输出信号存在信号能量弱、信号幅度不等以及信号间隔随机等特征^[7],探测器的输出信号属于典型的非平稳信号。探测器输出的非平稳信号在传输的过程中受到以热噪声为主,散弹噪声、粉噪声等多种不同类型的噪声干扰^[7]。噪声干扰将导致探测器的空间分辨率下降,影响探测器性能。

针对探测器输出信号受噪声干扰致使探测器性能下降的问题。西安光机所的缪振华等^[8]使用均方根滤波器对探测器输出信号进行降噪处理,此方法在一定程度上减少了探测器输出信号的噪声成分,有效提升了探测器的空间分辨率;Alberto等^[9]研究了最小均方(Least Mean Square, LMS)滤波器对探测器输出信号的降噪效果,仿真结果表明:LMS降噪算法可在一定程度上抑制探测器输出信号的热噪声;在LMS降噪算法的基础上Sergoi Zimmermann^[10]使用归一化最小均方(Normal Least Mean Square, NLMS)滤波器进一步提升了探测器输出信号信噪比,有效削弱了由于机械振动在探测器输出信号中引入的周期干扰。

均方根滤波器、LMS滤波器以及NLMS滤波器虽然能在一定程度上抑制探测器输出信号中的噪声成分,提升探测器的空间分辨率。但是,这些降噪方式依然存在固定的缺陷使其难以用于统计特征变化过快的非平稳信号降噪。如:平方根滤波器属于普通的平滑滤波器,面对非平稳信号难以取得稳定的降噪效果^[11];LMS滤波器一般适用于统计特征变化缓慢的非平稳信号降噪或者平稳信号降噪,且该滤波器存在算法发散及收敛速度慢等风险^[12,13];NLMS滤波器虽然在LMS滤波器的基础上通过归一化输入信号的二范数加速了算法收敛速度,但是算法发散的风险依然存在^[14]。

除平滑滤波器及自适应滤波器外,近年来,信号降噪领域还发展出了卡尔曼滤波^[15]、经验模态分解^[16](Empirical Mode Decomposition, EMD)、总体经验模态分解^[17](Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)、基于神经网络的降噪算法^[18]以及小波阈值降噪算法^[19]等降噪方案,这些降噪方法凭借其自身特性应用于不同的应用场景。在最近发展处的降噪理论中,小波阈值降噪算法具备强大的非平稳信号处理能力,与上述降噪算

法相较而言具备计算效率高、计算复杂度低、算法实时性好以及降噪效果彻底等优势,小波阈值降噪算法常被用于非平稳信号的降噪处理^[20-22]。为了尽可能地提升探测器输出信号的信噪比,改善探测器性能。本文提出了一种基于信号预处理的小波阈值降噪算法,针对该算法的仿真及实验测试结果表明:本文提出的降噪算法能有效抑制探测器输出信号的噪声成分,提升探测器的空间分辨率。

1 算法简介

1.1 信号模型

根据前文所述探测器输出信号受噪声污染的特征,本文建立的探测器输出信号和噪声之间的模型表示为

$$x_n = s_n + e_n \quad (1)$$

式中, x_n 表示 n 时刻探测器读出电路的采样信号; s_n 表示 n 时刻探测器读出电路输出的期望信号(期望信号表示不受噪声干扰的信号); e_n 表示 n 时刻探测器读出电路的采样信号中包含的噪声。

1.2 算法原理

小波阈值降噪算法具备强大的信号降噪能力的关键在于信号之间表现出较强的相关性、噪声数据之间不相关。随着小波分解尺度的增加,信号的小波系数几乎不会衰减,但是噪声的小波系数衰减程度较大^[23]。通过设置合适的阈值,在阈值函数的映射下,将低于阈值的小波系数设置为零,保留大于等于阈值的小波系数,最后通过小波逆变换即可获得降噪后的信号,该过程也称为信号重构。

信号的信噪比差异对小波阈值降噪算法的降噪效果也存在较大影响。一般而言,信号的信噪比越高,降噪效果越佳。本文的探测器运行于外太空,昼夜温差大,不同时刻探测器输出信号的信噪比存在较大波动。为在不同信噪比条件下均能尽可能提升探测器输出信号的信噪比,本文提出了一种基于信号预处理的小波阈值降噪算法,该算法的原理为:先利用信号预处理算法将探测器输出信号的信噪比提升至某种程度,接着利用小波阈值降噪算法对预处理后的信号开展二次降噪处理以达到最大程度提升探测器输出信号的信噪比的目的。基于此目标,本文提出降噪算法的流程图如图1所示。

如图1所示,本文提出的基于信号预处理的小波阈值降噪算法流程图分为使用标识符“1”和标识符“2”表征的两个部分。虚线框内以标识符

“1”表示的内容代表本文算法的信号预处理流程;实线框内标识符“2”表示的内容为传统小波阈值降噪算法流程。图1的实线框内的 λ 表示小波阈值降噪算法的阈值、 σ 表示噪声标准差、 N 表示样本信号的样本长度、 $W_{(j,k)}$ 表示第 j 层编号为 k 的小波系数、 $f(W_{(j,k)})$ 表示小波阈值降噪算法使用的阈值函数。流程图1所涉及的算法原理如下文所述。

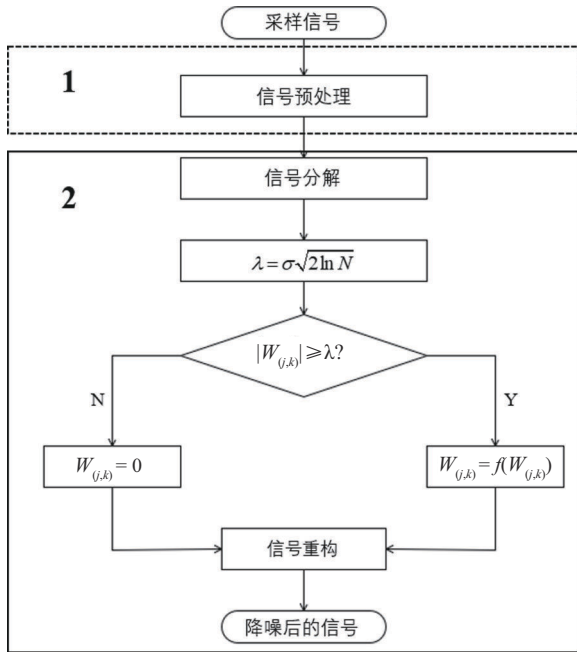


图1 基于信号预处理的小波阈值降噪流程图

1.3 信号预处理算法

信号预处理算法意在将受噪声污染严重的采样信号的信噪比提升至某种程度,便于后续小波阈值降噪算法最大限度地噪声从信号中剔除。因此,信号预处理算法不宜对采样信号过度处理,以免破坏采样信号的统计特征,不利于小波阈值降噪算法对预处理后的信号的进一步处理。本文使用的信号预处理算法为指数加权滑动平均(Exponential Weighted Moving Average, EWMA)算法,该算法的数学表达式表示为

$$s_n = \alpha \times s_{n-1} + (1 - \alpha) \times x_n \quad (2)$$

式中, s_{n-1} 表示 $n-1$ 时刻的期望信号; α 表示指数加权滑动平均算法中的指数加权因子, $\alpha \in (0, 1)$ 。 α 越小,表示当前时刻采样信号 $x(n)$ 的权重越大;反之, α 越大,表示采样信号 $x(n)$ 的权重越小。

本文使用信噪比及均方根误差评价不同加权因子 α 的取值下,不同降噪算法的降噪效果。最终选取信噪比最大及均方根误差最小时对应的 α 值作为信噪比为15dB条件下加权因子 α 的取值。其他信噪比条件下的加权因子 α 的取值方法与信噪比为15dB时相同,限于篇幅,在此不再赘述。

信号的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)及均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),的数学表达式表示为

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^N s^2(n)}{\sum_{n=1}^N (s(n) - d(n))^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (s(n) - d(n))^2} \quad (4)$$

式中, $d(n)$ 表示期望信号 $s(n)$ 的估计值; N 表示采样信号的样本长度。式(3)用于计算信号的信噪比SNR,信噪比SNR的值越大,表示降噪后的信号 $d(n)$ 中的残留噪声成分越少, $d(n)$ 和 $s(n)$ 越接近;式(4)用于计算期望信号 $s(n)$ 和估计信号 $d(n)$ 的均方根误差RMSE。RMSE的值越小,表示期望信号 $s(n)$ 和估计信号 $d(n)$ 之间的误差越小,表明算法的降噪性能越强。

开展 α 的最佳取值仿真测试时令 α 的初始值从0.1开始,依次递增0.1,直至最高取值0.9,共可获得9个不同 α 的取值。将不同值的 α 带入本文提出的降噪方法对信噪比为15dB的信号进行降噪,将降噪后的信号的信噪比和信号的均方根误差与传统小波阈值降噪方法对相同信噪比相同信号降噪后的结果进行对比。为排除单次结果带来的误差,上述比对过程需要重复多次。本文重复了10次,共获得9个不同 α 值分别对应的10组数据,将信号的信噪比和跟信号的均方根误差取算数均值作为最终的比对结果。信号的信噪比为15dB时,9个不同 α 值下,本文提出降噪算法输出信号和传统小波阈值降噪算法输出信号各自的信噪比及信号的均方根误差的比对结果分别如图2和图3所示。

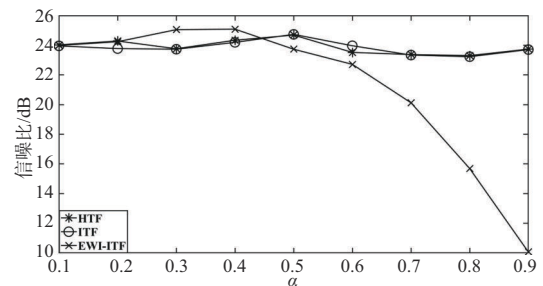


图2 信噪比为15dB时,不同 α 取值下不同降噪算法输出信号的信噪比比图

图2的横坐标表示加权因子 α 的不同取值,纵坐标表示不同 α 取值条件下,不同降噪算法输出信号的信噪比。图2中,以标识符“HTF”标识的曲线代表基于硬阈值函数的传统小波阈值降噪算法输出信号的信噪比;以标识符“ITF”标识的曲线代表基于软阈值函数的传统小波阈值降噪算法输出信号的信噪比;以标识符“EWI-ITF”标识的

曲线代表不同 α 取值时, 本文提出的降噪算法输出信号的信噪比。

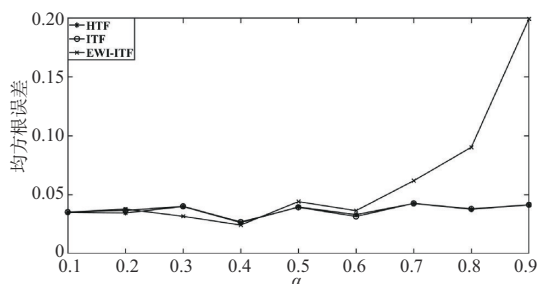


图3 信噪比为 15dB 时, 不同 α 取值下不同降噪算法输出信号的平均根误差对比图

如图 2 所示, 加权因子 α 从最小值 0.1 递增到 0.4 时, 本文提出的降噪算法输出信号的信噪比呈增大趋势。加权因子 α 等于 0.4 时本文提出降噪算法输出信号的信噪比达到最大值 25.06dB。此后, 随着加权因子 α 的递增, 本文提出的降噪算法输出信号的信噪比呈减小趋势, 此减小趋势随着加权因子 α 的递增愈发明显, 当加权因子 α 的值等于 0.9 时, 本文提出降噪算法输出信号的信噪比达到最小值, 仅为 10.06dB。在不同加权因子 α 取值下, 基于软、硬阈值函数的传统小波阈值降噪算法的输出信号的信噪比无太大波动, 基于硬阈值函数的传统小波阈值降噪算法的输出信号的信噪比的均值为 23.89dB。基于软阈值函数的传统小波阈值降噪算法的输出信号的信噪比的均值为 23.85dB。基于上述分析, 信号的信噪比为 15dB 时, 加权因子 α 本文拟初步定为 0.4。

图 3 的横坐标表示加权因子 α 的不同取值, 纵坐标表示不同 α 取值下不同降噪算法输出信号的平均根误差。图中以标识符 “EWI-ITF”、“HTF” 以及 “ITF” 标识的曲线分别表示本文提出降噪算法、基于硬阈值函数的小波阈值降噪算法以及基于软阈值函数的小波阈值降噪算法输出信号的平均根误差值。

如图 3 所示, 加权因子 α 从最小值 0.1 递增到 0.4 时, 本文提出的降噪算法输出信号的信噪比呈减小趋势, 表示当加权因子 α 从最小值 0.1 递增到 0.4, 本文提出降噪算法输出信号的噪声残留越来越少。当加权因子 α 等于 0.4 时, 本文提出降噪算法输出信号的平均根误差达到最小值 0.02。此后, 随着加权因子 α 的递增, 本文提出的降噪算法输出信号的平均根误差呈增大趋势, 此增大趋势随着加权因子 α 的递增愈发明显, 当加权因子 α 的值等于 0.9 时, 本文提出降噪算法输出信号的平均根误差达到最大值 0.20。在不同加权因子 α 取值下, 基于软、硬阈值函数的传统小波阈值降噪算法的输出信号的平均根误差无太大波动, 基于硬阈值函

数的传统小波阈值降噪算法的输出信号的平均根误差的均值为 0.04。基于软阈值函数的传统小波阈值降噪算法的输出信号的信噪比的均值为 0.04。

根据上述基于信噪比及信号的平均根误差的分析结果, 当信号的信噪比为 15dB 时, 选定本文提出降噪算法的加权因子 α 取值为 0.4。当信号的处于其他信噪比条件下时, 加权因子 α 取值方法和信号的信噪比为 15dB 时的取值方法相同。

实际工程中, 由于星载仪器的电子学系统一般均会以冗余备份的形式增加星载仪器的可靠性 (为增加星载仪器的可靠性, 以本文探测器为例, 探测器的读出电路均会制作相同参数及结构的两份。一般情况下, 探测器开机时其中一份读出电路工作, 另外一份作为备份不工作)。实际工程中, 为了获取探测器读出电路输出信号的实际信噪比, 可将备份电路开机以测出式 (1) 中的噪声信号 e_n , 利用正常工作的电路测出式 (1) 中采样信号 x_n , 利用已知的 x_n 和 e_n 即可获得不受噪声污染的信号 s_n 的估计值 $d(n)$ 。最后利用式 (3) 即可获知实际条件下的信噪比的近似值, 根据此信噪比近似值, 利用查找表的方式即可获得本文算法的加权因子 α 的实际取值。

1.4 小波阈值降噪算法

使用小波阈值降噪算法对采样信号进行降噪时, 小波基、信号分解层数、阈值及阈值函数等因素共同决定了小波阈值降噪算法的降噪效果。面对不同类型的采样信号, 小波基、阈值及阈值函数的选择也不尽相同。经仿真测试, 本文使用的小波基为 Coiflet 小波, 阈值选择通用阈值^[24], 阈值函数使用 Lu Jing-yi^[25]提出的提升阈值函数, 信号分解层数为 6 层。通用阈值及本文使用的提升阈值函数的数学表达式表示为

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\text{median}(W_{(i,j)})}{0.6745} \quad (6)$$

$$W_{(i,j)}^* = \begin{cases} \text{sgn}(W_{(i,j)}) \left\{ |W_{(i,j)}| - \frac{\lambda}{\exp\left[\frac{\beta(|W_{(i,j)}| - \lambda)}{\lambda}\right]} \right\} & |W_{(i,j)}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{(i,j)}| < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式 (5) 中的 λ 表示利用通用阈值算法确定的阈值, σ 表示噪声的标准差。噪声的标准差可由式 (6) 确定, 式 (6) 中, $\text{median}()$ 表示取中值运算, $W_{(i,j)}$

表示采样信号的小波分解系数。式 (7) 的 β 为提升阈值函数的调整因子, $\beta \in (0, \infty)$ 。改变调整因子 β 的值可控制提升阈值函数向硬阈值函数的逼近速度。 β 越大, 提升阈值函数向硬阈值函数的逼近速度越快, 重构信号和原始信号的接近程度也越高, 但是, 过大的 β 值可能导致重构信号出现震荡, 信号震荡将导致后续信号寻峰环节时发生峰值识别错误, 最终致使探测器发生解码错误。

2 仿真测试

为测试本文提出算法的降噪性能, 将对该算法 (后文使用 EWI-ITF 代替) 与传统基于硬阈值的小波阈值降噪算法 (后文使用 HTF 代替) 以及基于提升阈值的小波阈值降噪算法 (后文使用 ITF 代替) 的降噪性能开展仿真对比测试。仿真测试时 β 的值等于 1.5, 设采样信号的最低信噪比为 -5dB, 其后依次递增 5dB 至最高信噪比 30dB。信号的脉冲宽度为 20 μ s、信号的采样率为 20MHz、信号的幅度随机分布于 0.1v 至 2v、相邻信号间不存在脉冲堆积。采样信号的信噪比为 -5dB 时, 期望信号与采样信号的图像如图 4 所示。

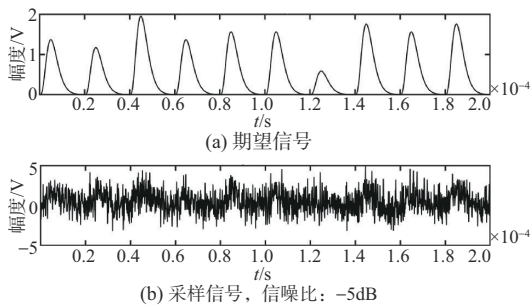


图 4 期望信号与信噪比为 -5dB 的采样信号的对比图

使用本文提出的 EWI-ITF 算法与传统的 HTF 算法以及改进阈值的 ITF 算法对图 4 所示的信噪比为 -5dB 的采样信号进行降噪处理后的输出信号如图 5 所示。

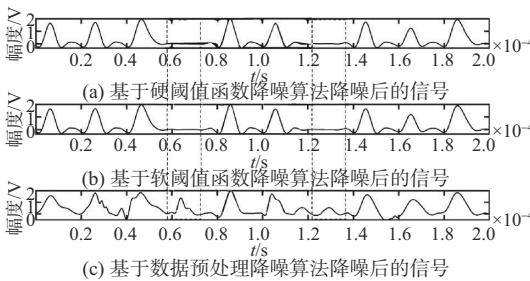


图 5 信噪比为 -5dB 时不同降噪算法的输出信号

图 5 的横坐标表示时间, 纵坐标表示信号的幅度。对比图 4 所示的期望信号与图 5 所示的使用不同降噪算法降噪后的输出信号可知: HTF 降噪算法以及 ITF 降噪算法将信噪比为 -5dB 的采样信号

视为噪声剔除的情况发生了两次, 分别如图 5 中的虚线方框 1 和虚线方框 2 所示。而本文提出的 EWI-ITF 降噪算法并未发生将信号视为噪声剔除的情况。据此可知, 本文提出的 EWI-ITF 降噪算法对信号和噪声的识别能力比传统的 HTF 降噪算法以及 ITF 降噪算法更强。

为全面对比 EWI-ITF 降噪算法与 HTF 降噪算法以及 ITF 降噪算法的降噪性能, 需要对上述算法开展定量对比。不同信噪比条件下 HTF 算法、ITF 算法以及 EWI-ITF 算法输出信号的信噪比以及仿真数据分别图 6 及表 1 所示。

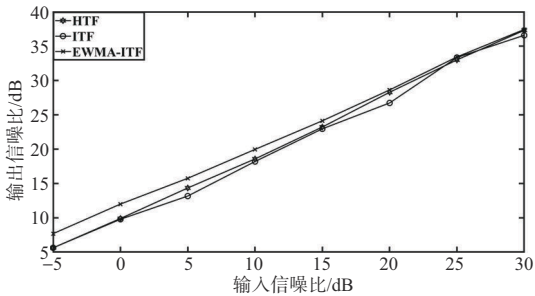


图 6 不同信噪比条件下不同降噪算法输出信号的信噪比
表 1 HTF、ITF 及 EWI-ITF 算法输出信号的信噪比

输入信号 SNR	不同降噪算法输出信号 SNR		
	HTF	ITF	EWI-ITF
-5dB	5.62	5.62	7.68
0dB	9.89	9.78	11.99
5dB	14.34	13.16	15.75
10dB	18.57	18.20	19.96
15dB	23.22	22.96	24.13
20dB	28.29	26.73	28.62
25dB	33.00	33.35	33.43
30dB	37.31	36.60	37.43

观察图 6 可知, 在测试信噪比范围内, EWI-ITF 算法输出信号的信噪比均高于 HTF 算法和 ITF 算法, 表明本文提出的 EWI-ITF 算法的降噪能力优于 HTF 算法和 ITF 算法, 此优势在低信噪条件下 (信噪比低于 10dB) 较为显著。

分析表 1 中的仿真数据可知: 表 1 所示的不同信噪比条件下, HTF 算法输出信号的信噪比增量 (信噪比增量定义为降噪算法输出信号的信噪比与输入信号的信噪比的差值) 分别为: 10.62dB、9.89dB、9.34dB、8.57dB、8.22dB、8.29dB、8.00dB 以及 7.31dB, 信噪比增量均值为 8.78dB; ITF 算法输出信号的信噪比增量分别为: 10.62dB、9.78dB、8.16dB、8.20dB、7.96dB、6.73dB、8.35dB 以及 6.59dB, 信噪比增量均值为 8.30dB; EWI-ITF 算法输出信号的信噪比增量分别为: 12.68dB、11.99dB、10.75dB、9.96dB、9.13dB、

8.62dB、8.43dB 以及 7.43dB, 信噪比增量均值为 9.88dB。EWMA_ITF 算法输出信号的信噪比增量均值比 HTF 算法输出信号的信噪比增量均值高 1.10dB、比 ITF 算法输出信号的信噪比增量均值高 1.58dB。以信噪比为比对基准, EWI-ITF 综合降噪性能比 HTF 降噪算法高 11.09%, 比 ITF 降噪算法的降噪性能高 15.97%。

不同信噪比条件下 HTF 算法、ITF 算法以及 EWI-ITF 算法输出信号的均方根误差及相关仿真数据分别如图 7 及表 2 所示。

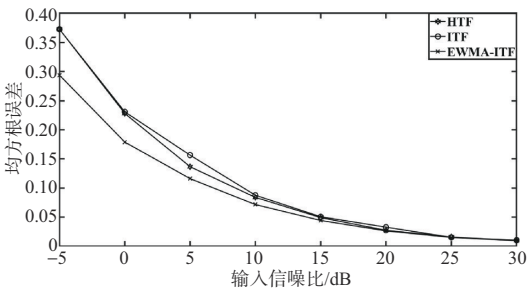


图 7 不同信噪比条件下不同降噪算法输出信号的均方根误差

表 2 HTF、ITF 及 EWI-ITF 算法输出信号的均方根误差

输入信号 SNR	不同降噪算法输出信号 RMSE		
	HTF	ITF	EWI-ITF
-5dB	0.37	0.37	0.29
0dB	0.23	0.23	0.18
5dB	0.14	0.16	0.12
10dB	0.08	0.09	0.07
15dB	0.05	0.05	0.04
20dB	0.03	0.03	0.03
25dB	0.02	0.02	0.02
30dB	0.01	0.01	0.01

如图 7 所示, 不同信噪比条件下, EWI-ITF 算法输出信号的均方根误差均小于 HTF 算法和 ITF 算法输出信号的均方根误差。表明相较 HTF 算法和 ITF 算法, EWI-ITF 算法的输出信号和期望信号之间存在更小的差异, EWI-ITF 算法输出信号和期望信号的相似程度更高, 即 EWI-ITF 算法输出信号具备更高的保真度。

分析表 2 中的数据可知, 表 2 所示的不同信噪比条件下 HTF 算法、ITF 算法以及 EWI-ITF 算法输出信号的均方根误差均值分别为 0.12、0.12 以及 0.09。据此可知 EWI-ITF 算法输出信号和期望信号的相似度分别比 HTF 算法和 ITF 算法高 18.16% 和 21.01%。

使用本文提出的 EWI-ITF 算法与传统的 HTF 算法以及 ITF 算法对不同信噪比条件下相同采样信号的降噪仿真结果表明, 本文提出的 EWI-ITF 算法的降噪性能优于传统的 HTF 算法以及提升阈

值的 ITF 算法, 仿真结果证明本文提出 EWI-ITF 算法的优越性。为测试 EWI-ITF 算法是否适用于实际的采样信号, 有必要使用 EWI-ITF 算法对探测器输出的采样信号开展实验测试。

3 实验验证

3.1 实验方案

为了验证本文提出 EWI-ITF 算法的有效性, 需要对该算法开展试验对比测试。实验方案为: 从氙灯出射的光经过平行光管调整后均匀照射于 USAF1951 空间分辨率掩膜板上, 经掩膜板的光线由透镜组聚焦成像于探测器的光学输入窗口。探测器及其电子学系统采集入射到光学输入窗内的光子, 通过反演光子的坐标即可获得掩膜板的图像。实验时对探测器内不同组件施加的电压分别为 -300v、-1800v、-2600v 以及 -2650v, 积分时间为 20 分钟。对比使用 EWI-ITF 算法前后探测器采集到的 USAF1951 分辨率板图案的空间分辨率差异, 即可验证 EWI-ITF 算法的降噪性能。实验原理示意图如图 8 所示。

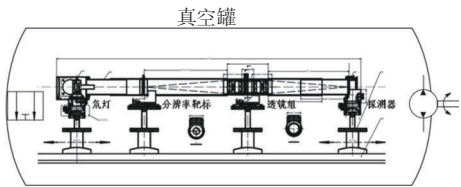


图 8 探测器空间分辨率测试原理图

3.2 实验结果

开展探测器空间分辨率测试实验时需要使用 USAF1951 分辨率板卡, 使用分辨率板卡测量探测器的空间分辨率的原理为在分辨率靶标上刻画不同间距、不同粗细的黑白条纹。黑色条纹不透光, 白色条纹可透光。令探测器采集分辨率板卡的图像, 分析探测器采集的图像能清晰辨识分辨率板卡的那组条纹的那个元素, 该组元素的间距即为探测器的空间分辨率。本文使用的分辨率板卡示意图如图 9 所示, 图 9 中的分辨率板卡的不同组内的不同元素对应的分辨率信息如表 3 所示。

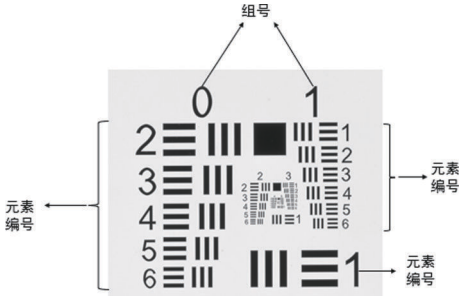
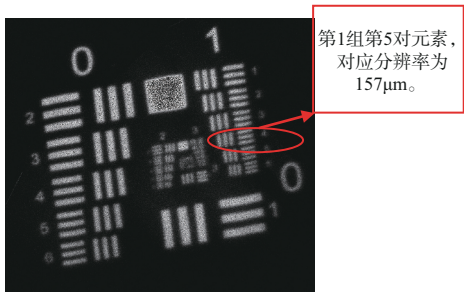


图 9 USAF1951 分辨率测试板卡示意图

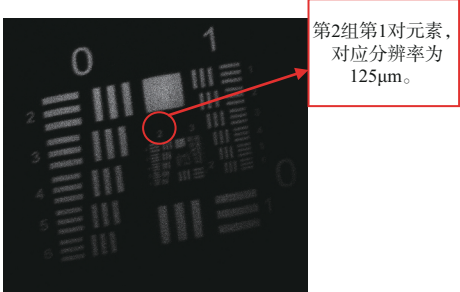
表 3 USAF1951分辨率板的不同元素对应的分辨率值对照表(μm)

组元素	0	1	2	3	4
1	500.00	250.00	125.00	62.5	31.25
2	445.45	222.72	111.36	55.68	27.84
3	396.85	198.43	99.21	49.61	24.80
4	353.55	176.78	88.39	44.19	22.10
5	314.98	157.49	78.75	39.37	19.69
6	280.62	140.31	70.15	35.08	17.54

如表 3 所示，假设探测器采集的空间分辨率



(a) 降噪前探测器的空间分辨率



(b) 降噪后探测器的空间分辨率

图 10 EWI-ITF 算法降噪性能测试结果

如图 10 (a) 所示，使用未经降噪处理的原始采样信号反演的掩模板图像仅可分辨到第一组的第五对元素，对照表 3 的分辨率板卡对应的分辨率数据可知，探测器的最高空间分辨率约为 $157\mu\text{m}$ ；利用 EWI-ITF 降噪算法对采样信号进行降噪处理后的信号反演的掩模板图像如图 10 (b) 所示，观察图 10 (b) 可知：该图中最高可分辨第二组的第一对元素，对照表 3 的分辨率板卡对应的分辨率数据可知，此时探测器的最高空间分辨率约为 $125\mu\text{m}$ 。相较图 10 (a) 的 $157\mu\text{m}$ 的空间分辨率，使用 EWI-ITF 算法降噪后反演的图像的空间分辨率提升了 $32\mu\text{m}$ ，实验结果证明了 EWI-ITF 算法的有效性。

4 结 论

为解决探测器输出信号受噪声污染导致探测器空间分辨率下降的问题，本文提出了一种基于信号预处理的小波阈值降噪算法用于改善探测器输出信号的信噪比，最终达到提升探测器空间分辨率的目标。仿真及实验结果均表明本文提出降噪算法的有效性。

本文通过降噪算法改善探测器输出信号的信噪比提高了探测器的空间分辨率，据此可知：探测器的空间分辨率和探测器输出信号的信噪比成正相关关系，探测器输出信号的信噪比越高，探测器的空间分辨率也越高。因此，可从提升探测

板卡的图像最多只能清晰观察到图像的第 0 组的第 1 对元素，则表明探测器的空间分辨率为 $500\mu\text{m}$ 。

为验证 EWI-ITF 算法的降噪性能需开展两次空间分辨率测量实验。第一次实验，使用未经降噪的原始采样信号解算入射到分辨率板内的光子坐标，结果如图 10 (a) 图所示。第二次实验，使用本文提出的 EWI-ITF 算法降噪后的输出信号解算入射到掩模板内的光子坐标，由解算的光子坐标形成的掩模板图像如图 10 (b) 图所示。

器输出信号的信噪比入手以达到提升探测器空间分辨率的目标。

参考文献：

[1] 中国科学院, 国家航天局, 中国载人航天工程办公室. 国家空间科学中长期发展规划 (2024-2025) [EB/OL]. (2024-10-16)/[2025-04-13]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202410/content_6980618.htm.
Chinese Academy of Sciences, National Space Administration, China Manned Space Engineering Office. National medium and long-term development plan for space science (2024-2050) [EB/OL]. (2024-10-16)/[2025-04-13]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202410/content_6980618.htm.
[2] Llopart X, Aloy J, Ballabriga R, et al. Timepix4, a large area pixel detector readout chip which can be tiled on 4 sides providing sub-200 ps timestamp binning[J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(1):C01044—C01060.
[3] Yang K, Bai Y, Wang B, et al. Optimization of multilayer capacitive charge division anode for MCP imaging detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, 5(14):1063.
[4] H U Frey, S B Mende, R R Meier, et al. In flight performance of the Far Ultraviolet Instrument (FUV) on ICON [J]. Space Sci Rev, 2023, 219, 1:1—23.
[5] Jaeheung Park, Stephen B Mende, Richard W Eastes, et al. Climatology of equatorial plasma bubbles in Ionospheric Connection Explorer/Far-UltraViolet (ICON/FUV) limb images [J]. Journal of Astronomy and Space Sciences, 2022, 39(3):87—98.
[6] Ding G X, Li J W, Zhang X X, et al. Wide-field aurora imager

- onboard Fengyun satellite: data products and validation[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, 5(1):73—78.
- [7] Ahmed S N. Physics and engineering of radiation detection[M]. San Diego: Academic Press, 2007:536—544.
- [8] 缪震华. 基于楔条形阳极探测器的单光子成像系统 [D]. 西安: 中国科学院研究生院 (西安光学精密机械研究所), 2008: 116.
- Miu Zhenhua. A single photon imaging system based on wedge and strip anodes detector[D]. Xi'an: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2008:116.
- [9] Alberto D, Bussa M P, Falletti E, et al. Digital filtering for noise reduction in nuclear detectors[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2008, 7:382—388.
- [10] Sergio Z. Active microphonic noise cancellation in radiation detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2013, 729:404—409.
- [11] Kannan K, Kanna B R, Aravindan C. Root mean square filter for noisy images based on hyper graph model[J]. *Image & Vision Computing*, 2010, 28(9):1329—1338.
- [12] Aboulnasr T, Mayyas K. A robust variable step-size LMS-type algorithm: analysis and simulations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 45(3):631—639.
- [13] Rai A, Kohli A K. Convergence analysis of LMS based adaptive filter[C]//International Conference on Methods and Models in Science and Technology (ICM2ST-10). Chandigarh, India, :AIPC, 2010:89—104.
- [14] M M. Dewasthale, R D. Kharadkar. Improved NLMS algorithm with fixed step size and filter length using adaptive weight updation for acoustic noise cancellation[C]//2014 Annual IEEE India Conference (INDICON), Pune, India:IEEE, 2014:1—7.
- [15] Ono T, Kim H W, Cho M, et al. A study on reducing the noise using the kalman filter in Digital Holographic Microscopy (DHM)[J]. *Electronics*, 2025, 14(2):338—355.
- [16] S I Dosko, S A Sheptunov, A Ryad, et al. Application of empirical mode decomposition to reduce signal noise[C]//2023 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), Petrozavodsk, Russian Federation:TEEE, 2023:115—118.
- [17] Peng K, Guo H, Shang X. EEMD and multiscale PCA-based signal denoising method and its application to seismic p-phase arrival picking[J]. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2021, 21(16):5271—5286.
- [18] Li B, Zhang Y, Chen W, et al. Neural network-based investigation of periodic noise reduction methods for high-resolution infrared line scanning images[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(5): 841—865.
- [19] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 41(3):613—627.
- [20] Li X, Liao K, He G, et al. Research on improved wavelet threshold denoising method for non-contact force and magnetic signals[J]. *Electronics*, 2023, 12(5):1244—1260.
- [21] Ouyang C, Cai L, Liu B, et al. An improved wavelet threshold denoising approach for surface electromyography signal[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2023(1): 108—132.
- [22] Li Z, Xu H, Jiang B, et al. Wavelet threshold ultrasound echo signal denoising algorithm based on CEEMDAN[J]. *Electronics*, 2023, 12(14):1—18.
- [23] Zhang M, Lu C, Liu C. Improved double-threshold denoising method based on the wavelet transform[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(8):23—28.
- [24] Can H, Jianchun X, Juelong L, et al. A new wavelet threshold determination method considering interscale correlation in signal denoising[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2:1—9.
- [25] Jing-Yi L, Hong L, Dong Y, et al. A new wavelet threshold function and denoising application[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1(5):1—8.