arXiv:2304.00728v1 [astro-ph.IM] 3 Apr 2023

利用傅里叶变换揭示潜在天体起源信号的詹姆斯·韦布空间望远镜中红外仪器成像数据后处理初步研究

G¨uray Hatipo˘glu

2023年4月4日

摘要

本文报告了一项专项研究的部分成果，该研究旨在区分詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）中红外仪器（MIRI）成像模式下的信号源。文中介绍了MIRI仪器及其特性。随后将讨论一种基于快速傅里叶变换的滤波方法及其结果。

詹姆斯·韦布空间望远镜中红外（MIRI）仪器

詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）中红外仪器（MIRI）的工作波长范围为 4.9 至 27.9 μm。中红外仪器有四种不同的模式来利用这一波段范围内的信息：成像模式（九个测光波段）、低分辨率狭缝与无狭缝光谱、中分辨率光谱（配有四个不同的积分视场单元，IFU），以及使用四种滤光片的日冕仪观测 [5]。下一小节将进一步介绍成像模式。

成像模式特性

MIRI成像仪的波长范围为 5.6 至 22.5 微米，清晰视场尺寸为 74” x 113”。所有滤光片均达到衍射极限；波长短于 15 微米时，灵敏度受天文背景限制，而波长短于 15 微米的滤光片则受到主镜和遮阳板相关的望远镜背景限制。下表总结了中红外仪器中的滤光片特性。

表 1：中红外仪器滤光片特性 [5]

滤光片	λ_0 (μm)	$\Delta\lambda_0$ (μm)	半高全宽（角秒） [1]	备注
F560W	5.6	1.2	0.207	宽带成像，欠采样
F770W	7.7	2.2	0.269	多环芳烃，宽带，奈奎斯特采样
F1000W	10.0	2.0	0.328	硅酸盐，宽带，过采样
F1130W	11.3	0.7	0.375	多环芳烃，较窄带宽，过采样
F1280W	12.8	2.4	0.420	宽带，过采样
F1500W	15.0	3.0	0.488	宽带，过采样
F1800W	18.0	3.0	0.591	硅酸盐，宽带，过采样
F2100W	21.0	5.0	0.674	宽带，过采样
F2550W	25.5	4.0	0.803	宽带，过采样

[1]点扩散函数（PSF）的半高全宽

设置 MIRI 成像观测的参数包括滤光片、抖动模式、子阵列选择、探测器读出模式和曝光时间（包括帧数和积分时间）。有多种子阵列模式可用于处理非常明亮的源或背景（表 2）。

表 2：中红外仪器子阵列特性 [6]

子阵列	尺寸（像素）	可用尺寸（角秒）	帧时间
FULL	1024 x 1032	74” x 113”	2.775 秒
明亮天空	512 x 512	56.3” x 56.3”	0.865 秒
SUB256	256 x 256	28.2” x 28.2”	0.300 s
SUB128	128 x 136	14.1” x 14.1”	0.119 秒
SUB64	64 x 72	7” x 7”	0.085 秒

抖动选项可对 PSF 进行过采样、去除坏像素，并优化自校准流程。

Aim

詹姆斯·韦布空间望远镜的中红外仪器图像似乎存在若干空间周期性斑块、图案和形状，其来源可能并非天体，且可能遮蔽真实天体。傅里叶变换是一种成熟的方法，可从时间序列或二维图像数据中滤除或提取周期信号。本文介绍了一种对詹姆斯·韦布空间望远镜中红外仪器三级校准图像进行后处理的初步方法。

方法论

本研究主要采用两种不同的方法处理数据，具体内容见“方法”小节。要进行类似分析，需要使用 Python 3.x 环境，以及 Astropy（用于打开 FITS 图像）、NumPy（用于执行快速傅里叶变换）和 Matplotlib（用于绘制结果）软件包。此案例的便捷函数可在 https://github.com/torna4o/fft_for_jwst 中找到。

背景

傅里叶级数是用无限多个正弦分量表示任意类型周期信号的一种形式[2]:

$$g(t) = \alpha_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m cos(\frac{2\pi mt}{T}) + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n sin(\frac{2\pi nt}{T})$$

这种傅里叶级数展开可以表示连续且平滑的数据。其复数形式如下:

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{t\frac{2\pi nt}{T}}$$

constat c_n 的最优值为:

$$c_0 = \frac{1}{2} c_n = \frac{1}{i\pi n}, n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, ... c_n = 0, n = \pm 2, \pm 4, \pm 6, ...$$

傅里叶变换方法将这一方法扩展到非周期函数。

$$F[g(t)] = G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{2-\pi ift} dt$$

傅里叶变换的一个性质是线性；也就是说，两个任意函数之和的傅里叶变换，与分别对这两个函数进行傅里叶变换后再求和，结果相同。

这种方法直接使用预定义滤波器处理数据。另一种方法是以编程方式找出数据冗余部分的特定频率，并尝试将其滤除。本研究将在一维重塑矩阵数据上使用 Welch 方法 [7]，并逐一对二维原始数据进行滤波。

$$X_1(j) = X(j) j = 0, 1, 2, ..., L-1,$$
$$X_2(j) = X(j+D) j = 0, 1, 2, ..., L-1,$$
$$X_K(j) = X(j+(K-1)D) j = 0, 1, 2, ..., L-1$$

这些数据将与 W 数据窗相乘，并对其进行有限傅里叶变换 .

$$A_k(n) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} X_k(j) W(j) e^{-2kijn/L}$$

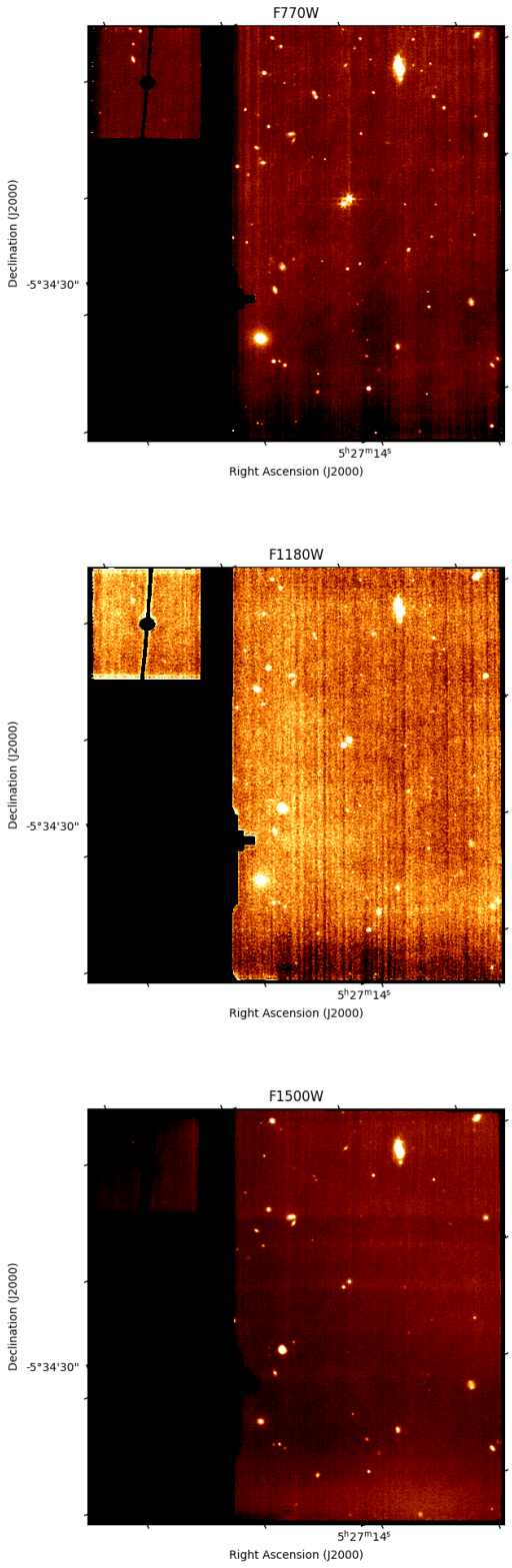
现在有 K 个修正周期图:

$$I_K(f_n) = \frac{L}{U} |A_k(n)|^2; k = 1, 2, ..., K$$
$$f_n = \frac{n}{L}, n = 0, ..., L/2$$
$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} W^2(j)$$

以上 K 个周期图的平均值即为谱估计。

Data

数据来自 Mikulski Archive for Space Telescopes Portal。这是 ERS 项目类别、恒星物理科学类别下的公开数据，项目标题为$RadiativeFeedback\ from\ MassiveStars\ as\ Traced\ by\ Multiband\ Imagingand\ SpectroscopicMosaics$。首席研究员为 Olivier N. Berne，项目编号为 01288[4]。目标赤经（十进制度）为 81.8308，目标赤纬为 -5.5345。读出模式为 FASTR1，主要抖动模式为"4点"。



5 图 1：JWST-MIRI 在 F770W、F1130W 和 F1500W 滤光片下的成像数据

方法

成像数据中存在一些看起来并非源自天体的图样（图2）。滤除这类数据的一种成熟方法是使用傅里叶变换以及低通或高通滤波器。图像数据中一部分没有任何空间不连续性的区域被裁剪出来（尺寸为560×780像素）。

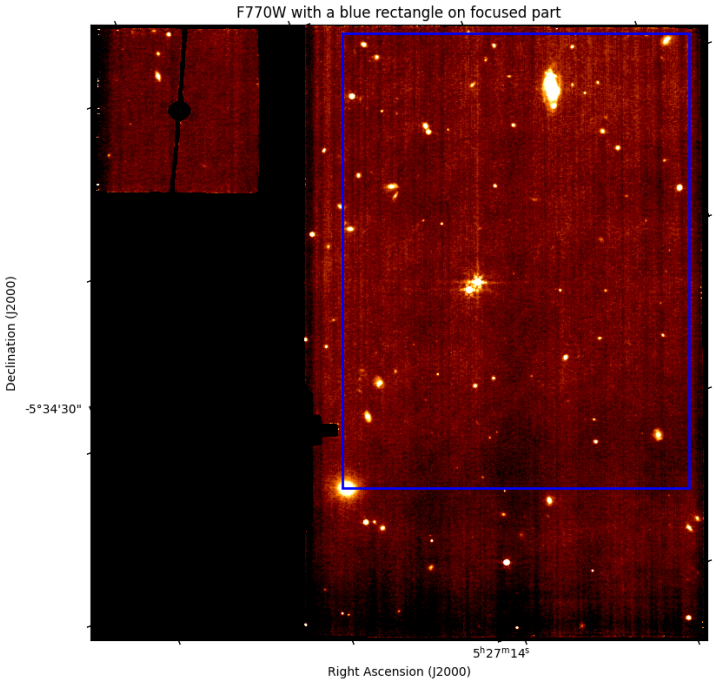


图2：所有滤光片下感兴趣区域的 JWST-MIRI 成像数据

随后，对这幅图像应用了以下傅里叶变换方法。

球形滤波频率去除

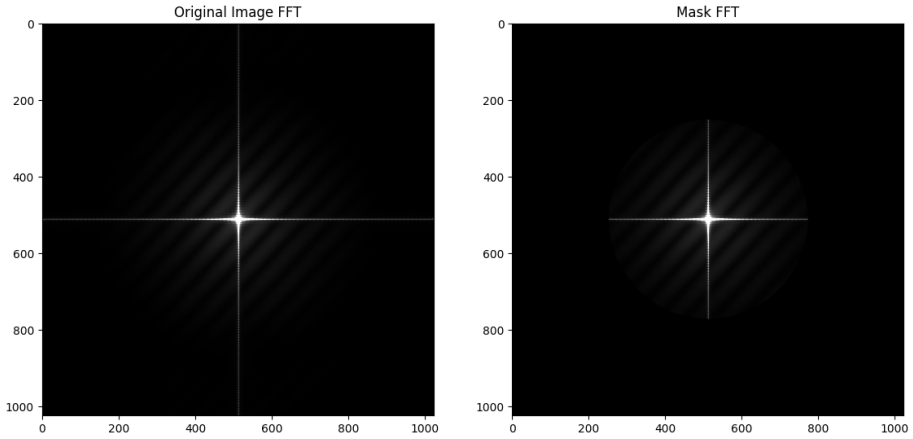
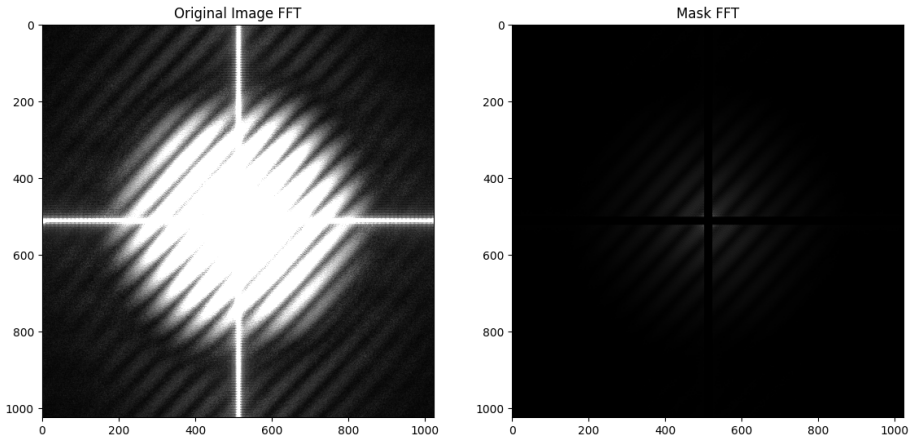


图 3：半径可调的圆形频率掩模，本例中半径为 260 像素 s

通过这种方式，需要选择的唯一参数就是该圆的半径。此外，还提供了一个反转掩模，其中保留了对这一圆形区域进行滤波后剩余的数据。

十字形频率去除

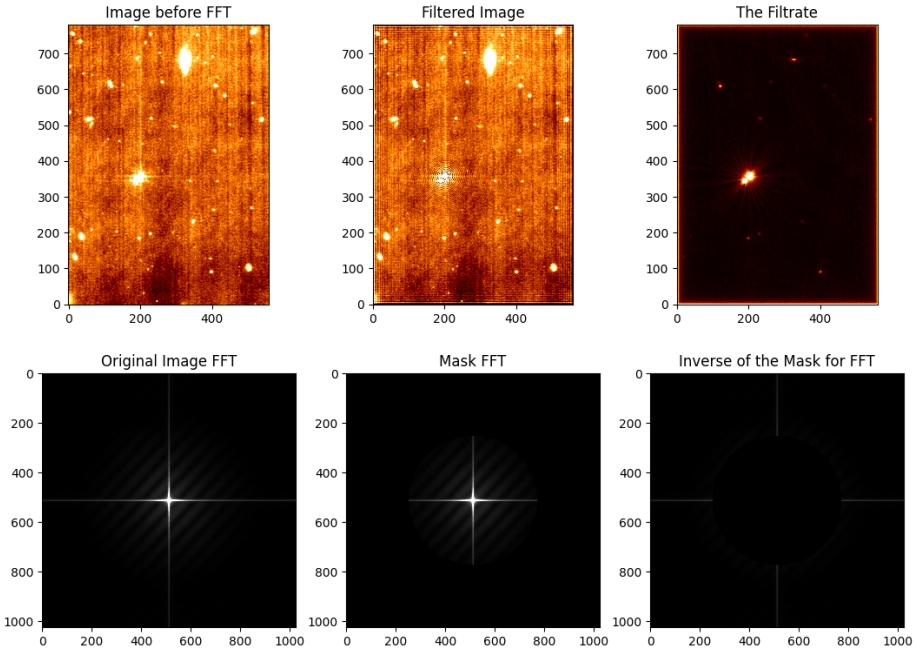


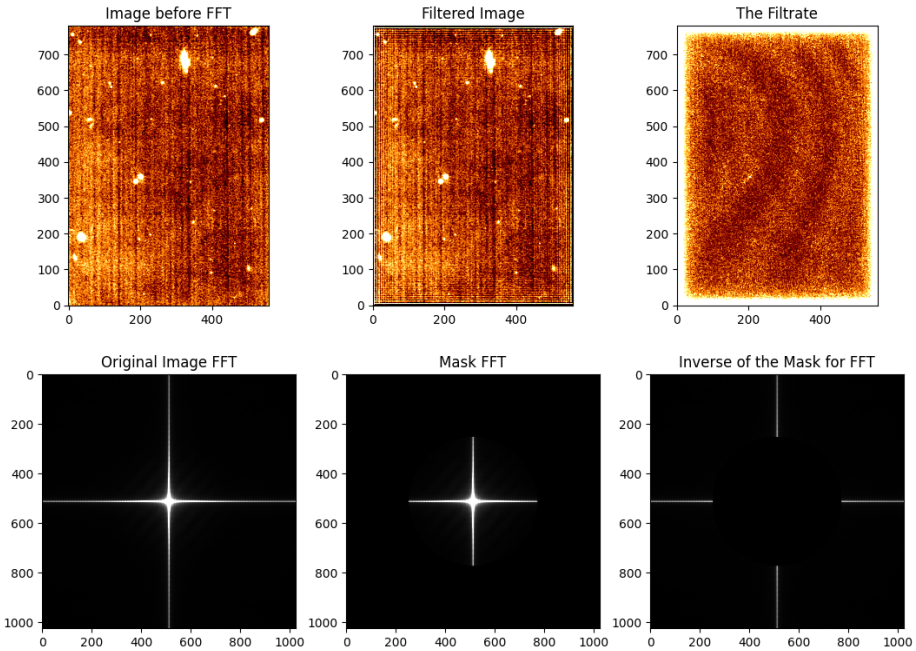
Figu图 4：水平和垂直线条粗细可调的十字形频率掩模 s

模式识别与特定信号去除

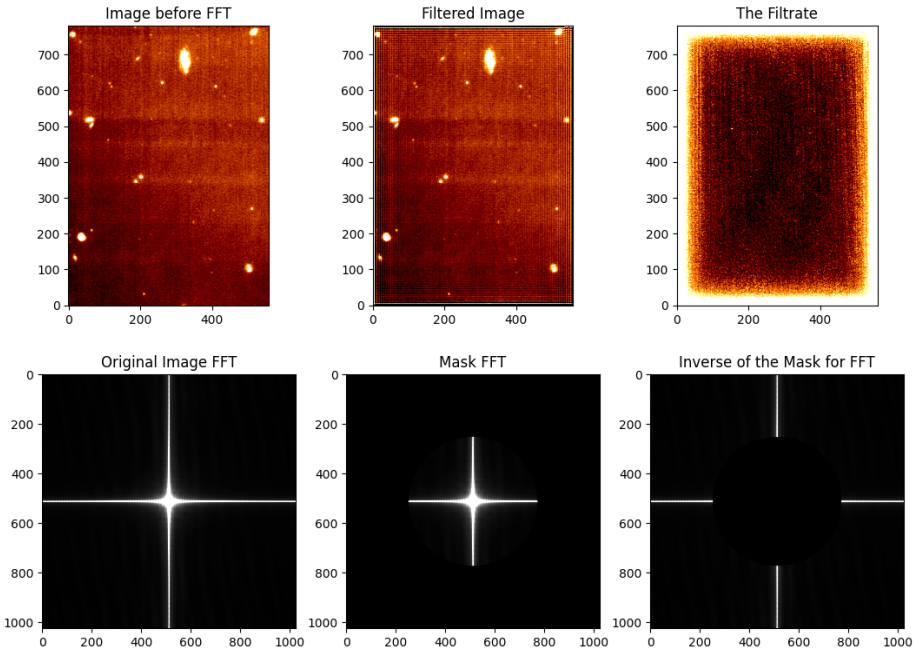
Thi这种方法没有预先定义的滤光片，而是根据数据构建滤光片 .
As 如前所述，该代码使用 Welch 方法和基于傅里叶变换的操作。

结果基于圆形滤波器频率的去除





Fig图5：所有滤光片在频域中采用圆形进行频域滤波，从 top 上至下依次为 F770W 和 F1130W



Fig图 6：在频域中使用阈值为 260 像素的圆形滤波 e
freqF1500W 滤光片的频域

十字形去除

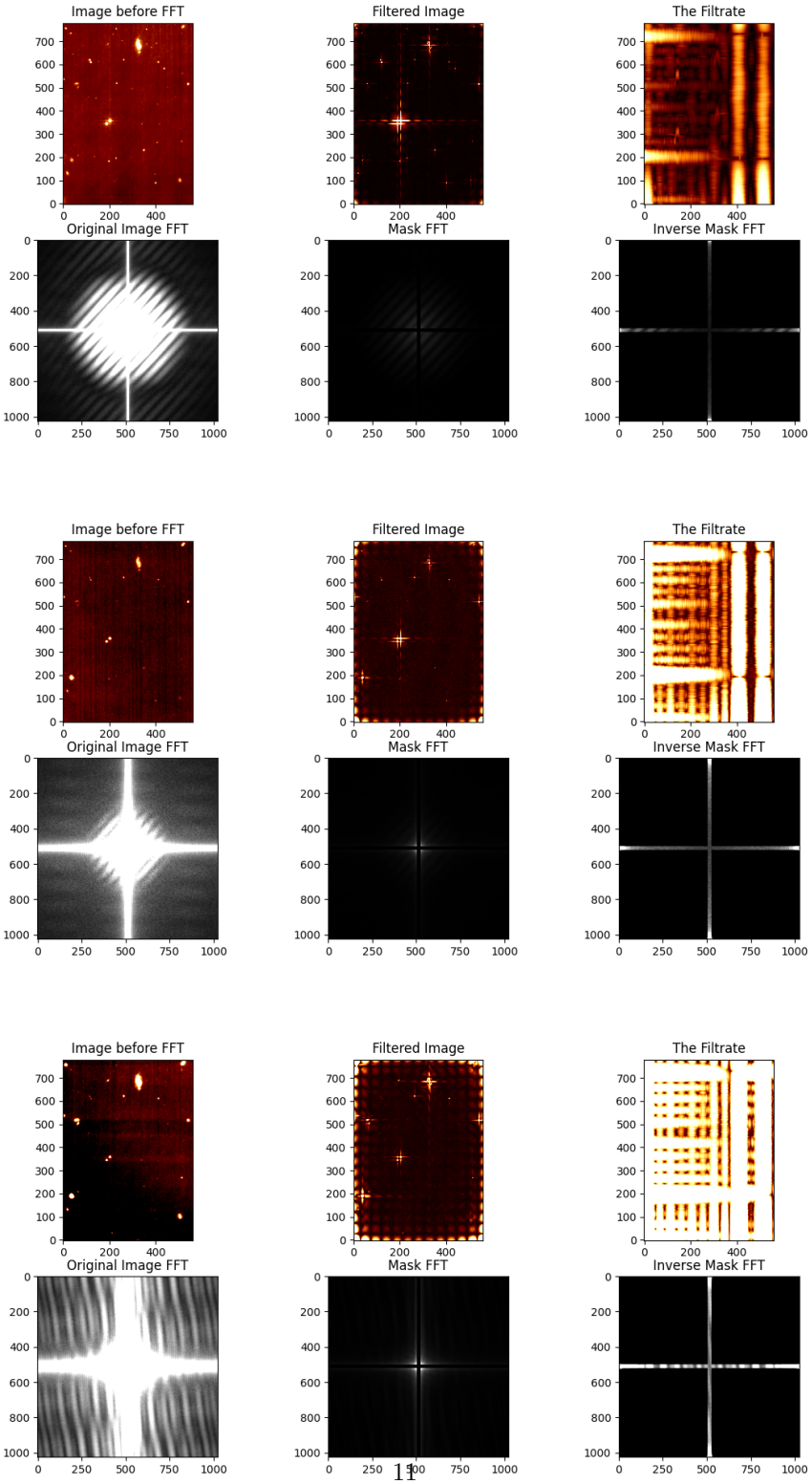
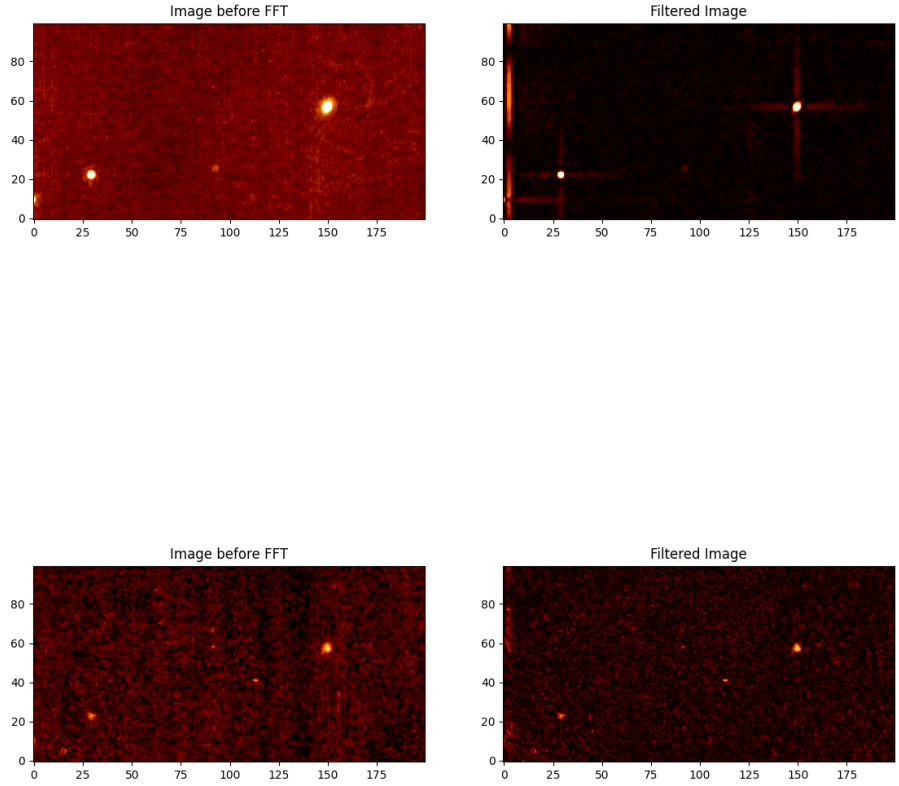


图7：所有带有十字形的滤光片的频域滤波，从上到下依次为 F770W、F1130W 和 F1500W

以下图像展示了经跨形状频域滤波后聚焦区域的结果 .



Figu图 8：区域中进一步聚焦的部分，用于比较在所有滤光片的
从上到下分别为 F770W 和 F1130W

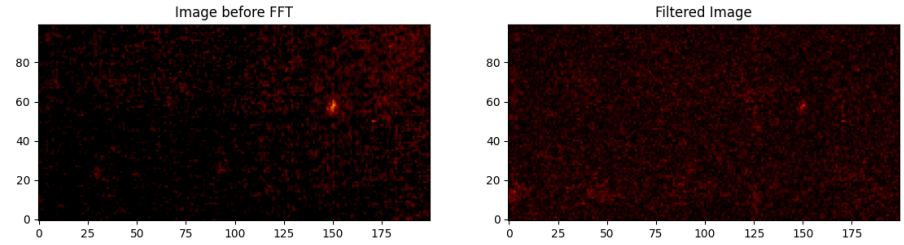


图9：区域中进一步聚焦的部分，用于比较 F1500W 滤光片在光谱维度上应用十字形掩膜的结果

在所有情况下，该方法都去除了傅里叶变换前数据中存在的垂直条纹。然而，只有在 F1130W 滤光片中，才能看到明显影响，并发现潜在天体。

使用 Welch方法进行模式识别和特定信号去除

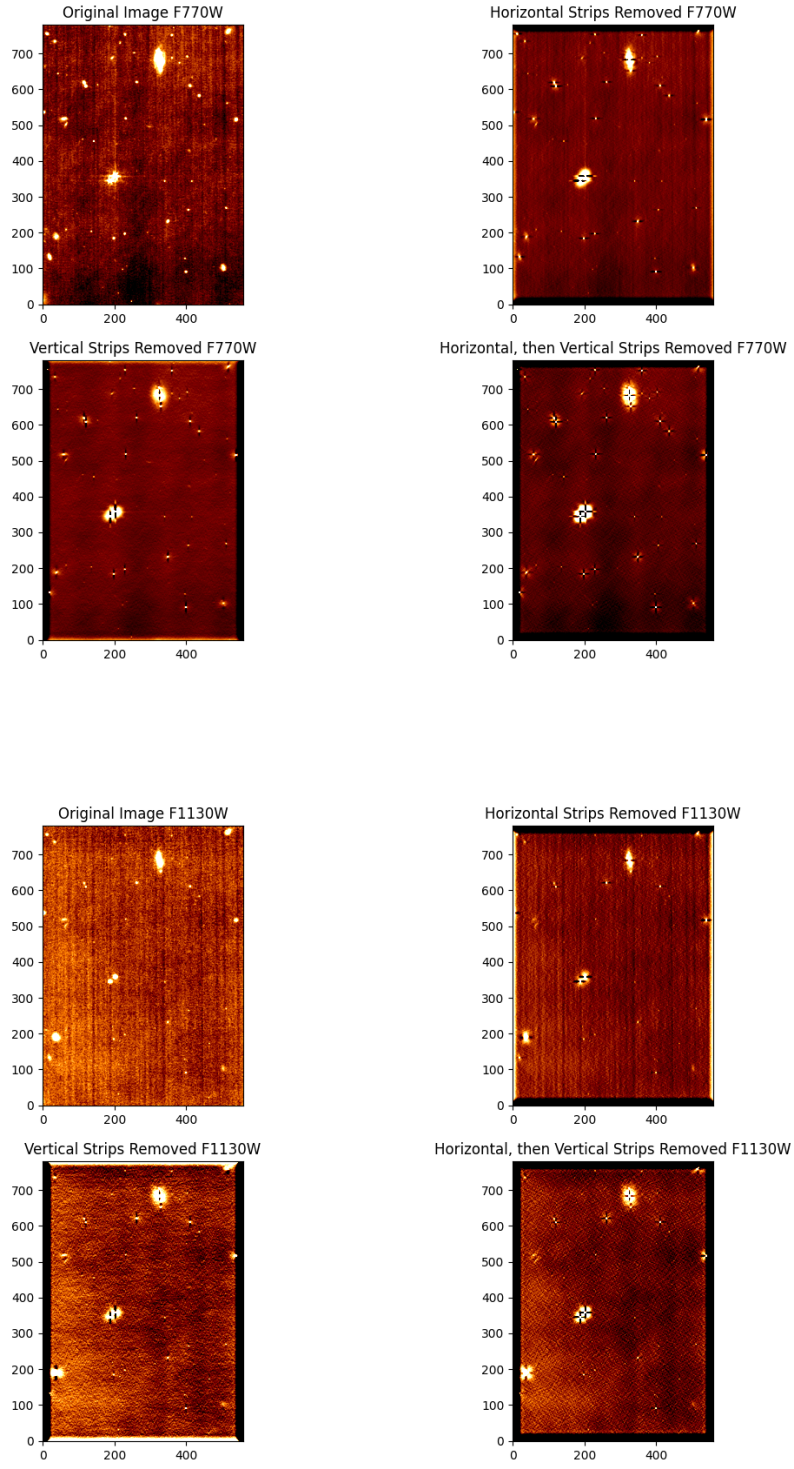
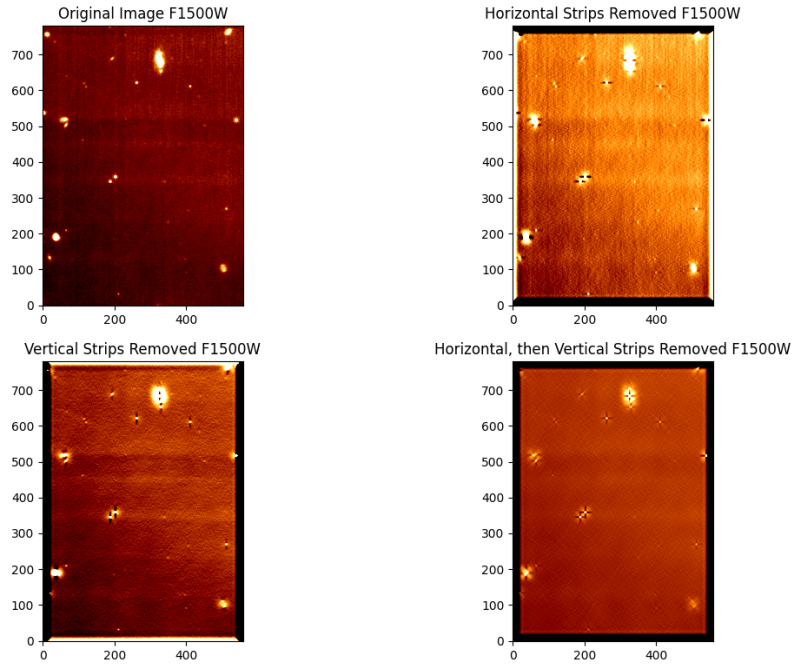


图10：区域中进一步聚焦的部分，用于比较所有滤光片在光谱维度上的特定信号去除结果，从上到下依次为 F770W 和 F1130W



Fig图 11：区域中进一步聚焦的部分，用于比较特定信号去除后的结果 1
in sF1500W 滤光片的光谱维度

讨论

目标是去除数据中存在的条纹，以揭示或增强来自真实天体的信号。初步试验取得了一些颇有希望的结果，有助于更精确地识别造成垂直条纹（所有滤光片中均存在）和水平条纹（尤其是在 F1500W 中）的信号，并将其从图像中提取出来。

采用像素半径阈值为 260 的圆形滤波器，大幅减少了图像中的垂直条纹（图 4），并完全消除了较粗的水平条纹（图 5）。然而，反转掩膜图像中引入了一种沿垂直方向贯穿图像的新波浪状图案（图 4 和图 5）。仅在 F1500W 中发现了几个疑似存在信号的点（图 5，右上方“The Filtrate”图像中的位置：x=∼175，y=500）。

由于数据在频域中具有明显的十字形成分，因此也应用了十字形掩膜以观察其结果。与圆形掩膜情况下遇到的波浪图案（图4和图5）相比，该操作在滤波后的图像中引入了一种似乎易于复现的网格图案，其在角落处幅度较高，并向中心呈正弦式递减。然而，该操作确实去除了最初存在的条纹图案；尤其是对于 F1130W滤光片（图7，下方），图像中出现了更多可能值得关注的点（位置：x=∼ 45，y=20）。

与模式识别相关的方法确实去除了图像中的大部分或全部水平和垂直条纹。然而，这是以牺牲恒星信号幅度和亮像素邻域数量为代价的，这很可能会影响源检测算法的结果。此外，在应用该方法的方向上，以及主要亮度源的垂直和水平方向半径处，还存在不良边缘。尽管其表现不同于之前的方法，该方法在减去图案时也导致了一些信号损失（图10和图11）。

总结

应用快速傅里叶变换并解读结果时，需要考虑若干注意事项。首先是待分析图像中边缘的影响。这也是不纳入整幅图像，而是裁剪出一块没有空间不连续性的特定区域的原因。然而，图像本身并非完全由特定图案构成，旋转图案的傅里叶变换结果也相当复杂[3]。因此，仅检查频域图像很难滤除非天体信号。下一步可以尝试一种方法，检查原始图像中特定信号预期的频域幅度和相位，从而充分利用快速傅里叶变换。解决这一问题的另一种方式是尝试其他方法，例如离散余弦变换（DCT） [1], ；直观而言，对于天文图像中的像素，离散余弦变换更擅长处理离散信号中的边缘。

另一个需要考虑的问题是，快速傅里叶变换无法完全还原原始图像中的所有信号。应检查这是否会导致显著的信息损失。

最后需要考虑的是剩余的条带、线条和图案，它们可能呈倾斜方向。至少对于这些方法，反复应用会严重削弱图像。这是未来研究需要解决的另一个问题。

参考文献

[1] N. Ahmed、T. Natarajan 和 K.R. Rao。离散余弦变换。*IEEE*计算机汇刊，C-23(1):90–93，1974。doi:10.1109/T-C.1974.223784。[2]Pete Bevelacqua。傅里叶级数——傅里叶系数。网址：https://www. thefouriertransform.com/series/coefficients.php。[3] John M. Brayer。图像处理中的傅里叶变换简介。网址：https: //www.cs.unm.edu/~ brayer/vision/fourier.html。[4] STScI。Ers 1288。网址：https://www.stsci.edu/cgi-bin/get-proposal-info?id=1288& amp;observatory=JWST。[5] STScI。詹姆斯·韦布空间望远镜用户文档——中红外仪器，2016年12月。网址：https:// jwst-docs.stsci.edu/jwst-mid-infrared-instrument。[6] STScI。詹姆斯·韦布空间望远镜用户文档——MIRI成像，2016年12月。网址：https://jwst-docs. stsci.edu/jwst-mid-infrared-instrument/miri-observing-modes/miri-imaging。[7] P. Welch。利用快速傅里叶变换估计功率谱：一种基于短时平均修正周期图的方法。*IEEE*音频与电声汇刊，15(2):70–73，1967。doi:10.1109/TAU.1967.1161901。