0254-6124/2008/28(4)-356-05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Liu Xin, Li Baoquan. Optimizing process of the images captured by the Solar X-EUV imaging telescope. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(4): 356~360

太阳 X-EUV 成像望远镜的图像优化处理 *

刘 昕 [1,2] 李保权 [1]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

[2](中国科学院研究生院)

摘 要 太阳 X-EUV 成像望远镜主要用来监测和预报影响空间天气变化的太阳活动，成像资料专门服务于空间天气预报研究. 为了满足望远镜的空间适应性，望远镜获取的图像会受到其结构调制形成的噪声干扰. 本文主要对望远镜所获取的图像进行优化处理，讨论了傅里叶变换的物理意义及其在图像处理中的应用. 通过二维离散傅里叶变换，将图像变换到频率域空间；选用巴特沃思陷波滤波器滤波，通过程序设计，实际调试，在尽量减少图像失真的前提下，滤除图像中的周期性噪声. 优化后的图像有利于进一步分析太阳活动现象.

关键词 太阳 X-EUV 成像望远镜；傅里叶变换；图像处理；陷波滤波器

中图法分类号 V524

Optimizing Process of the Images Captured by the Solar X-EUV Imaging Telescope

LIU Xin[1,2] LI Baoquan[1]

[1](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

[2](*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

Abstract The solar X-EUV imaging telescope is mainly used to monitor and predict the solar activities that affect the space weather. The observed materials will be dedicated to the space weather forecast. For the space adaptability of the telescope, the image captured by CCD will be affected by the noise formed in structure modulation. This essay focuses on the optimizing process of the images captured by the telescope. It discusses the physical meaning of Fourier transform and its application in the image processing. With two-dimensional discrete Fourier Transform, images are transformed into frequency domain. With Butterworth wave-isolation filter, the program was designed and adjusted in practice, thus the periodicity noise in the image is smoothed to reduce the distortion of images as less as possible. The optimized images are favorable for further analysis of the solar activities.

Key words Solar X-EUV imaging telescope, Fourier transform, Image processing, Wave-isolation filter

* 国家自然科学基金项目资助 (40474069)

2007-09-28 收到原稿， 2008-03-10 收到修定稿

1　引言

开展空间天气预报需要实时的监测数据．这些数据可以来自天基监测设备和地基监测设备．但是由于天气变化、地球自转、观测手段等客观条件对地基观测的限制, 数据的实时获取有很大局限性, 所以地基监测只能作为一种辅助的监测手段，有效的空间天气数据获取必须依赖于天基监测系统．天基观测设备一般位于外层空间，没有大气层的影响，不受天气及昼夜的影响，是开展空间天气预报的必要条件.

人类对太阳 X 波段成像观测已经有近 30 年的历史, 尤其是 SKYLAB 的 S-054[1] 和 YOHKOH 卫星上的太阳 X 射线成像望远镜 (SXT)[2] 观测取得了大量的成果．综合国际上最新的研究结果 [3]~[6], 我们设计了一个专门服务于空间天气预报的太阳成像监测仪器, 即太阳 X-EUV 成像望远镜. 该望远镜工作于 X 射线波段和极紫外波段 [7]. X 射线由高温等离子体发出，辐射强度的变化直接显示等离子体的活动过程．高分辨的精细结构观测有利于对爆发现象的机理研究，也有利于把握潜在可能出现的活动区． X 射线波段还可以直接观测发生在日冕层的太阳高温活动，包括活动区、耀斑、日冕物质抛射 (CME) 等. 为了配合 X 波段的观测, 扩大望远镜低温端的响应，捕捉更多的太阳爆发先兆信息，望远镜增加了一个 EUV 波段的成像功能 (19.5 nm). 该波段与 X 射线比较, 更有利于观测日冕的早期演变或冕洞现象． X 射线和 EUV 的集成观测能够捕捉更多的太阳爆发先兆现象或伴生现象，成像资料可以涵盖更多的信息量.

太阳 X-EUV 成像望远镜是一种天基观测设备，直接工作在恶劣的空间环境中 [8],[9]. 其成像的核心设备是位于镜头内的一块 CCD, 在 CCD 前有一层非常薄的滤光膜．为了保证这层滤光膜牢固耐用，使用了一层金属网格对滤光膜进行加固，这就导致 CCD 所获取的图像会受到其结构调制形成的噪声干扰．本文主要对太阳 X-EUV 成像望远镜所获取的图像进行滤噪，优化处理.

2　滤噪原理分析

2.1　原始图像分析

太阳 X-EUV 成像望远镜获取的原始图像如图 1 所示．图 1 所示的噪声极不利于对图像的进一步分析．但可以发现图 1 所示的噪声有明显的周期性，如果直接在图像空间域进行中值或均值滤波，则图像的清晰度会大打折扣，同时丢失大量有用信号．傅里叶指出任何周期函数都可以表示为不同频率函数的正弦和或余弦和的形式．所以我们采用了频率域滤波．其核心思想是对原始图像进行二维离散傅里叶变换，将图像转换到频率域空间，在频率域空间中找出噪声对应的频谱并滤波，最后对图像进行反傅里叶变换．这样就能在尽量减少图像失真的情况下还原真实图像，滤除噪声信号.

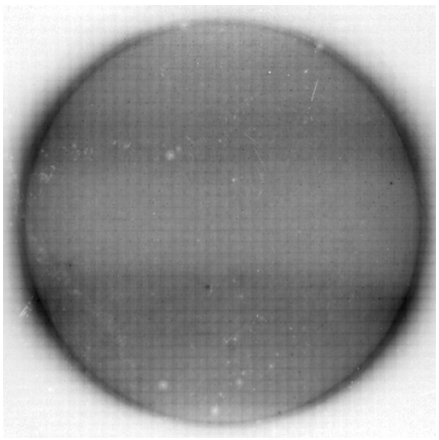

图 1　原始图像

Fig.1　Original image

2.2　二维离散傅里叶变换原理及物理思想

从数学的角度来看，傅里叶变换是一种特殊的积分变换．它能将满足一定条件的某个函数表示成正弦基函数的线性组合或者积分．根据傅里叶变换原理，任何连续测量的信号，都可以表示为不同频率的正弦波信号的无限叠加．与傅里叶变换算法对应的是反傅里叶变换算法．该反变换从本质上说也是一种累加处理，这样就可以将单独改变的正弦波信号转换成一个信号．傅里叶变换和反傅里叶变换都不会造成信号丢失.

离散傅里叶变换使得数学方法与计算机技术建立了联系，具有很重要的实用价值．一个图像尺寸为 $M \times N$ 的函数 $f(x,y)$ 的二维离散傅里叶变换为

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(ux/M+vy/N)}. \tag{1}$$

反傅里叶变换为

$$f(x,y)=\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}F(u,v)\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(ux/M+vy/N)}. \tag{2}$$

其中，u 和 v 为频率，x 和 y 为图像变量. 在进行图像的离散傅里叶变换前，通常用 $(-1)^{x+y}$ 乘以输入的图像函数，对图像进行中心变换. 由于傅里叶变换具有平移性质，即

$$f(x,y)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(u_0x/M+v_0y/N)}\Leftrightarrow F(u-u_0,v-v_0), \tag{3}$$

当 $u_0=M/2$, 且 $v_0=N/2$ 时，有

$$\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(u_0x/M+v_0y/N)}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\pi(x+y)}=(-1)^{x+y}. \tag{4}$$

那么式 (3) 可变为

$$f(x,y)(-1)^{x+y}\Leftrightarrow F(u-M/2,v-N/2). \tag{5}$$

式 (5) 说明了用 $(-1)^{x+y}$ 乘以 $f(x,y)$ 的作用是将 $F(u,v)$ 的原点变换到了频率域坐标下的 $(M/2,N/2)$. 在后面的计算机处理中，如果 M, N 皆为偶数，实际变换中心是

$$u=M/2+1,\quad v=N/2+1.$$

若令式 (1) 中 $u=0$, $v=0$, 可以得到

$$F(0,0)=\frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y). \tag{6}$$

对于一幅图像 $f(x,y)$, 式 (6) 说明了图像中心的傅里叶变换 $F(0,0)$ 表征图像 $f(x,y)$ 的平均灰度级. 傅里叶变换得到的 $F(u,v)$ 被称为 $f(x,y)$ 的频率域. 由于频率与变化率直接相关，那么频率域中，低频部分对应于图像的慢变化分量，例如墙壁、地板、或者万里无云的蓝天；而较高的频率则对应图像中变化越来越快的灰度级，这些部分往往对应于图像中的物体边缘、棱角、或者噪声.

3 图像滤噪过程

在频率域中滤波的步骤 [10] 如下.

①对原始图像进行中心变换;

②进行二维离散傅里叶变换;

③设计滤波器，在频率域滤波;

④进行反傅里叶变换，取结果的实部，反中心变换.

3.1 对图像进行中心变换和二维离散傅里叶变换

经过中心变换和二维离散傅里叶变换，可以得到图 1 的频率域 $F(u,v)$ (见图 2). 图 2 显示的是频谱的自然对数值. 对于图 2 中心的亮点，前文已经提到，其表征图像的平均灰度级，不能当作噪声滤除.

傅里叶指出任何周期函数都可以表示成不同频率函数的正弦和或余弦和的形式. 由于二维正弦函数的傅里叶变换是共轭的脉冲对 [11], 故周期性噪声成分对应于频谱图中的亮点对. 图 2 除中心外的多对亮点对应于图 1 中的周期性噪声. 亮度较高的亮点，对应的噪声信号频率较高，相反，亮点较低的亮点，对应的噪声信号频率较低.

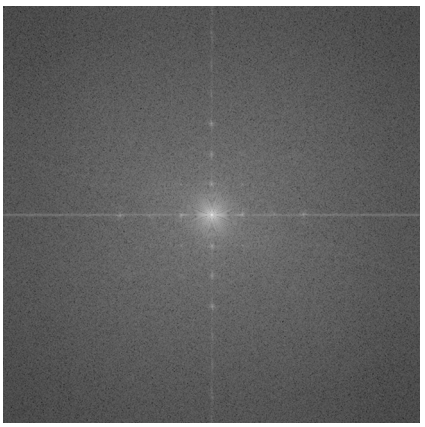

图 2 原始图像的频谱

Fig.2 Frequency spectrum of original image

3.2 设计滤波器函数

对于周期性噪声、带阻、带通和陷波滤波器，都能削减或消除周期性噪声. 由于陷波滤波器可以直接针对噪声信号，阻止事先定义的中心频率范围内的频率，较大程度上保留有用信号的频谱，故本文中选择了陷波滤波器. 由于傅里叶变换是对称的，那么陷波滤波器必须以关于原点对称的形式出现. 图 3 所示为两种典型的陷波滤波器.

n 阶巴特沃思陷波滤波器传递函数为

$$H(u,v)=\frac{1}{1+\left[\dfrac{D_0^2}{D_1(u,v)D_2(u,v)}\right]^n}, \tag{7}$$

$$D_1(u,v)=[(u-M/2-u_0)^2+(v-N/2-v_0)^2]^{1/2}, \tag{8}$$

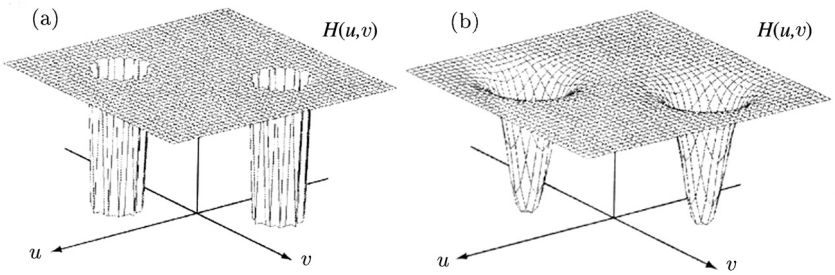

图 3　理想陷波滤波器 (a) 和 2 阶巴特沃思陷波滤波器 (b)

Fig.3　Ideal wave-isolation filter (a) and second-order Butterworth wave-isolation filter (b)

$$D_2(u,v) = [(u - M/2 + u_0)^2 + (v - N/2 + v_0)^2]^{1/2}. \quad (9)$$

其中，(u_0, v_0) 的值对应陷波中心，D_0 为陷波半径.

为了滤除图 2 中的 10 对比较明显的亮点 (外面 8 对亮点较弱), 首先将图 2 分块，每块图像只包含一个亮点. 找出每块图像的最大值，确定图 2 中亮点中心所在坐标. 本文使用 10 对 4 阶的巴特沃思陷波滤波器对频谱图像滤波，亮点中心坐标对应滤波器中心 (见图 4). 根据各亮点的明暗程度及半径，再经过程序调试，每对滤波器设定了不同的陷波半径.

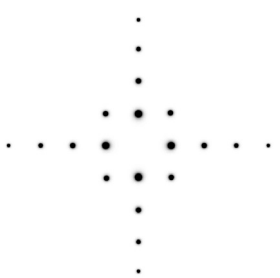

图 4　滤波器

Fig.4　Filter

3.3　频率域滤波

用滤波器函数 $H(u,v)$ 乘以 $F(u,v)$, 即在频域空间中去除掉的对应于周期性噪声的亮点，滤波后的频谱见图 5.

3.4　图像复原

对图像进行反傅里叶变换, 取出结果的实部, 乘以 $(-1)^{x+y}$, 即反中心变换，得到滤波后的图像 (见图 6). 可以看到噪声被明显削弱了，而图像细节有效地保留了下来.

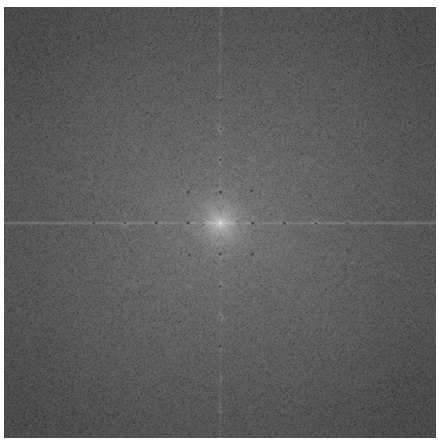

图 5　频率域滤波

Fig.5　Sieving wave in frequency domain

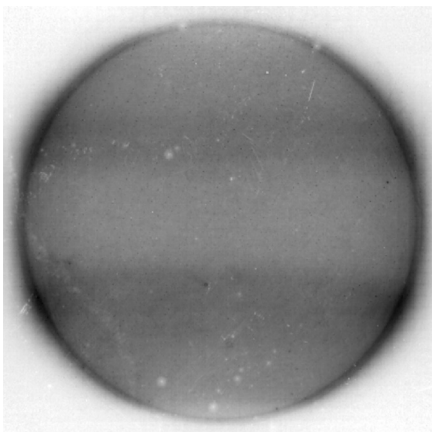

图 6　图像复原

Fig.6　Image restoration

4 小结

太阳 X-EUV 成像望远镜是一种新型的太阳风暴预警监测仪器，也是必备的空间天气预警监测设备，有着明确的应用背景，将安装于中国的系列气象卫星．为了适应恶劣的空间环境，我们对望远镜进行了文中所提到的结构调制，导致望远镜所获取的图像受到周期性噪声的干扰．本文具体讨论了其 CCD 成像的滤噪处理，对望远镜获取的图像进行了优化．在后续工作中，还将开发一套易用，操作性强的软件，完成对图像的优化处理，伪彩色增强，区域分析．

参考文献

[1] Moore R L. The Thermal X-Ray Flare Plasma, in Solar Flares. Colorado: Colorado Association University Press, 1980

[2] Watanabe T, Kosugi T, Sterling A C. Observational Plasma Astrophysics: Five Years of Yohkoh and Beyond. Boston: Dordrecht-Kluwer Academic, 1998

[3] Moses D, Clette F, Delaboudiniere J P *et al.* EIT observations of the extreme ultraviolet Sun. *Solar Phys.*, 1997, **175**:571∼599

[4] Delaboudiniere J P, Artzner G E, Branuad J *et al.* EIT: Extreme ultraviolet imaging telescope for the SOHO mission. *Solar Phys.*, 1995, **162**:291∼312

[5] Biesecker D A, Myers D C, Thompson B J *et al.* Solar phenomena associated with "EIT waves". *Astrophys. J.*, 2002, **569**:1009∼1015

[6] Li Baoquan *et al.* The development and status of space X-ray imaging telescope. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(4):302∼310. in Chinese (李保权等. 天基 X 射线掠入射式成像望远镜发展现状. 空间科学学报, 2004, **24**(4):302∼310)

[7] Li Baoquan *et al.* The solar X-EUV imaging telescope. *Chin. Geophys.*, 2005, **48**(2):235∼242. in Chinese (李保权等. 太阳 X-EUV 成像望远镜. 地球物理学报, 2005, **48**(2):235∼242)

[8] Baker D N. Effects of the Sun on the Earth's environment. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**:1669∼1681

[9] Baker D N. What is space weather. *Adv. Space Res.*, 1998, **22**:7∼16

[10] Gonzalez R C *et al.* Digital Image Processing (Second Edition). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. in Chinese (冈萨雷斯等. 数字图像处理 (第二版). 北京：电子工业出版社, 2005)

[11] Gonzalez R C *et al.* Digital Image Processing Using MATLAB. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007, 111∼112. in Chinese (冈萨雷斯等. 数字图像处理 (MATLAB 版). 北京：电子工业出版社, 2007. 111∼112)