

海洋生物全息图斜条纹噪声的抑制

刘玉翠¹ 汤春明²

(¹ 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)
² 天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要 全息相机系统对海洋微生物和粒子的研究与分析有着广泛的应用前景。然而这种特殊的成像技术(全息成像技术)和成像环境(海底)使拍摄的全息图存在多种不同的斜条纹噪声。斜条纹噪声的存在严重影响了海洋生物全息图重建像质量和进一步处理。抑制普通条纹的方法已不再适用于研究对象。因此,提出了一种有效的去噪方法。针对周期斜条纹噪声,利用局部阈值法寻找噪声频率位置,再采用高斯陷波滤波器滤除。针对非周期斜条纹噪声,通过直线方程模拟非周期斜条纹噪声的频域亮线响应,然后采用局部陷波滤波器去抑制。实验证明,该方法能有效滤除周期斜条纹噪声和较大程度地抑制非周期斜条纹噪声,并能有效保持有用信息。

关键词 全息;数字全息;斜条纹噪声;非周期斜条纹噪声;局部阈值;直线方程

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0809001

Suppressing Methods for Oblique Stripe Noise in the Image of Marine Microorganism

Liu Yucui¹ Tang Chunming²

¹ College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² College of Electronic and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

Abstract The holographic camera system for research and analysis on marine microorganisms and particles has a wide application prospect. Because of the special imaging technique (the holographic imaging technology) and the special imaging environment (seabed), there are a variety of different oblique stripe noises in the holograms. The existence of oblique stripe noises seriously affect quality of reconstructed image of the marine biological hologram and further processing, and the present methods for common stripe noise are no longer suitable. An effective method is proposed to deal with the oblique stripe noises. For the periodic oblique stripe noise, the local threshold method is adopted to find out the frequency center of the noise, and the Gaussian notch filter is utilized to eliminate the noise. For the aperiodic oblique stripe noise, the linear equation is used to simulate the bright line of the noise in the frequency domain, and the partial notch filter is exploited to depress the noise. Simulation results illustrate that the proposed method can filter out the periodic oblique stripe noise completely as well as the aperiodic oblique stripe noise mostly, and the useful information of the holograms can be kept.

Key words holography; digital holography; oblique stripe noise; aperiodic oblique stripe noise; local threshold value; equation of the straight line

OCIS codes 090.1995; 090.6186; 090.1000; 090.1760; 100.2000; 100.2650

1 引言

研究海洋生物和其他海底微粒对渔业生产和海洋科学基础理论有着非常重要的意义。数字全息技

术^[1-3]是近年来此项研究的重要手段之一,与普通成像技术相比,它可以非介入式和非破坏性地拍摄自然状态下的海洋生物和无机粒子,获得高分辨率

收稿日期: 2013-01-29; **收到修改稿日期**: 2013-05-06

作者简介: 刘玉翠(1984—),女,博士研究生,主要从事图像处理、全息技术等方面的研究。

E-mail: liuyucui_8602771@126.com

导师简介: 汤春明(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事图像处理、目标识别与追踪、数据处理与信息挖掘和网络安全检测等方面的研究。E-mail: tangchunming@hrbeu.edu.cn

的三维(3D)图像。但由于系统本身结构以及外界环境(例如水体浑浊度等)原因,拍摄的全息图经常带有斜条纹噪声,这种噪声的存在严重影响了重建像的质量及进一步的处理^[4]。因此寻找简单有效的全息图噪声去除算法具有重要的意义。

对于斜条纹噪声的抑制,最关键的一步是找准斜条纹噪声频率的位置。对于周期条纹噪声,确定条纹频率位置最常用的方法是投影法^[5-6]及其基础上的改进算法^[7]。这类方法对于水平或者垂直条纹效果很好,而对于全息图包含的多种斜条纹噪声,只能找到频域幅值比较大的噪声频率点位置,而对于频域幅值较小的则无能为力。对于非周期条纹噪声则多用人工手动确定其位置^[6]。Sun等^[8]曾于2008年对周期性斜条纹噪声进行了初步研究,其思想是手动确定斜条纹频率位置并将其置零。这种方法简单易操作,但不易准确定位斜条纹噪声频率中心,进而造成斜条纹噪声去除不彻底,并造成一定程度的重建像模糊。本文对此进一步深入研究,根据斜条纹噪声时频域响应特点,将全息图像所含斜条纹噪声分为两类:周期性斜条纹噪声和非周期性斜条纹噪声。针对两种斜条纹噪声提出其相对应的去噪方法。对10幅全息图中的斜条纹噪声进行抑制或滤除,并将实验结果与文献^[8]进行了对比。

2 全息图像斜条纹噪声

2.1 条纹噪声处理基础理论

不同的噪声处理方式不同,例如,椒盐噪声在空间域比较容易处理,而纹理噪声要借助各种变换,将图像转换到其他域才能更好地得到处理。

条纹噪声属于纹理噪声的一种,需借助某种变换转化到其他域处理。而二维傅里叶变换是图像处理中重要的分析工具,它将图像从空间域转换到频率域,从频率的角度去处理,从而使问题更轻松、更直接。由傅里叶的相关性质可以推出,若目标形状或者排列在空间域呈现某种方向性,那么在频域具有较高值的幅度谱也会呈现出与目标方向正交的方向性^[4]。

2.2 全息图像斜条纹噪声的分析

全息相机系统^[9]是用来分析、检测全球海洋生物和无机粒子的数量及其分布的。全息相机系统最早出现于19世纪60年代,之后随着全息技术的发展其结构不断被完善,以英国阿伯丁大学海洋实验室研制的系统最为完善。该系统集同轴和离轴全息于一体,能够捕捉几微米到几十厘米的微生物或粒

子,并于2006年被安置在北海和法罗群岛通道等海域进行测试。这种特殊的工作环境,要求全息相机系统的密封性要好。全息相机系统利用光学干涉原理制成,因此全息视频图像常常含有斜条纹噪声。全息图斜条纹噪声分为两种不同的类型:周期斜条纹噪声和非周期斜条纹噪声。

周期斜条纹又分为高频周期斜条纹噪声和低频周期斜条纹噪声。低频周期斜条纹噪声是由系统的CMOS传感器玻璃罩及其他光学原件产生的^[8],因此每帧视频图像中都会存在低频周期噪声。如图1所示,是一幅只含有低频周期噪声的全息图。通过实验观察,高频周期斜条纹噪声仅存在于部分视频图像中。如图2所示,是一幅含有低频和高频周期斜条纹噪声的全息图。由图1、2可以看出,全息图斜条纹噪声是周期的。但由于斜条纹有一定的倾斜度,使得每条斜条纹的长度不一样,由2.1节可知,全息图周期斜条纹噪声在频域与其方向正交的方向

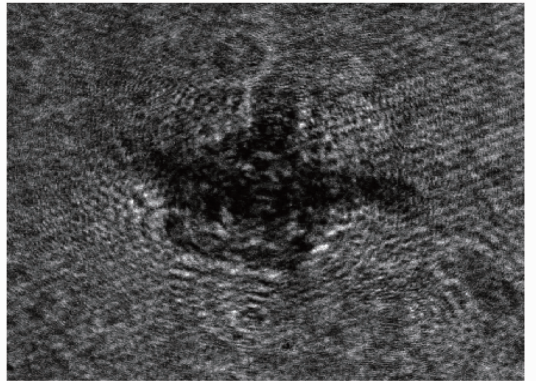


图1 只含有低频周期噪声的全息图

Fig. 1 Hologram containing only the low frequency periodic oblique stripe noise

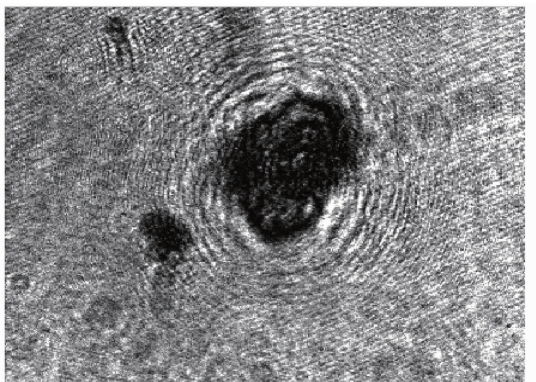


图2 含有低频和高频周期斜条纹噪声的全息图

Fig. 2 Hologram containing the low and high frequency periodic oblique stripe noises

上会出现两个较高值的幅度谱区,如图 3、4 所示。由图 4 可以看出,高频周期斜条纹噪声对应的幅度要比低频周期斜条纹噪声对应的幅度小很多。

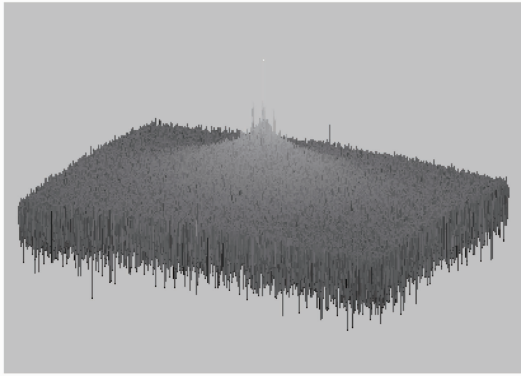


图 3 图 1 的幅度谱三维显示

Fig. 3 3D display for amplitude spectrum of Fig. 1

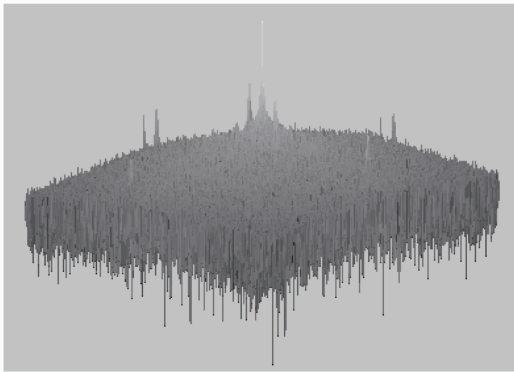


图 4 图 2 的幅度谱三维显示

Fig. 4 3D display for amplitude spectrum of Fig. 2

非周期斜条纹噪声同高频周期噪声一样,只存在于部分视频图像中,通过实验发现存在高频周期斜条纹噪声的全息视频图像必定存在非周期斜条纹噪声。如图 5 所示,是一幅含有周期斜条纹噪声和非周期斜条纹噪声的全息图。由图 5 可以看出,非

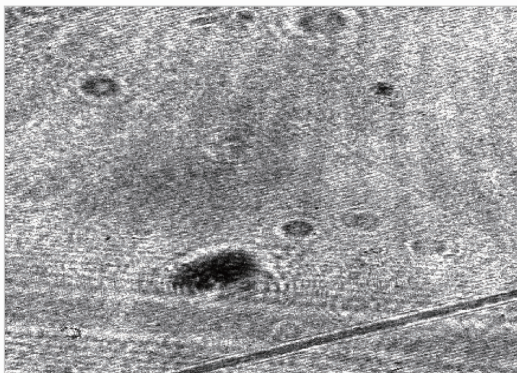


图 5 含有周期和非周期斜条纹噪声的全息图

Fig. 5 Hologram containing all types of oblique stripe noise

周期斜条纹噪声不具有周期性,而且非周期斜条纹噪声同样是斜条纹,每条斜条纹的长度不一样,在频域与其正交的方向上会表现为具有一定宽度的亮线,如图 6 所示。可以看出非周期斜条纹对应的频域亮线的幅值由高频到低频逐渐增大,但都比对应的周期斜条纹的幅值小很多。

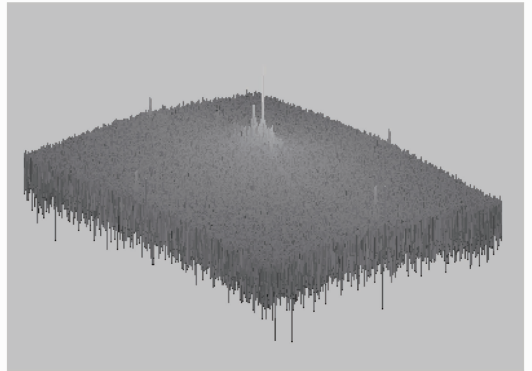


图 6 图 5 的幅度谱三维显示

Fig. 6 3D display for amplitude spectrum of Fig. 5

针对周期斜条纹噪声在频域对称的特点,提出局部阈值法寻找周期噪声频率中心点,然后采用平滑性较好的高斯陷波滤波器滤除。针对非周期斜条纹噪声在频域表现为具有一定宽度的亮线的特点,提出利用直线方程近似模拟亮线的位置,然后用局部陷波滤波器进行处理的方法。

3 全息图斜条纹噪声的抑制

由 2.2 节可知,全息图斜条纹噪声是多种类的,各类谱值差别较大,因此整体阈值法,投影法^[5-7]等不再适用于全息图斜条纹噪声频率中心的确定。针对周期斜条纹噪声,提出利用局部阈值法确定噪声频率中心的方法。目前对于周期性斜条纹噪声的消除,传统光学图像处理方法有频域理想陷波滤波器法,加窗高斯陷波滤波器法或者中值滤波器法等。以尽量消除周期性斜条纹噪声和减少有用信息损失为目的,选择平滑比较好的高斯陷波滤波器进行消除周期性斜条纹噪声。

非周期斜条纹噪声没有固定的周期和长度,在频域表现为与其方向正交的亮线,而不能形成特别突出的脉冲,因此不能利用确定周期斜条纹噪声频率的方法。通过 2.2 节分析可知,非周期斜条纹噪声可能存在两种情况:一种和低频周期斜条纹噪声方向相近;另一种和相对较高幅值的高频周期斜条纹噪声相近。根据上述特点,针对非周期斜条纹噪声,提出利用周期斜条纹频率中心,通过直线方程模

拟其频域响应亮线,基本确定其频率位置,然后以尽量抑制非周期斜条纹噪声和尽量减少有用信息损失为目的采用自定义模板滤波器抑制非周期斜条纹噪声。全息图斜条纹噪声抑制过程具体步骤如下:

1) 图像变换。对全息图进行二维傅里叶变换,并将零频点移到中心,取其幅度。假设待处理全息图为 I , 尺寸为 $M \times N$ 。幅度计算公式可表示为

$$F_I = \| \mathcal{F}(I) \|, \quad (1)$$

2) 分区。由于零频点及其附近能量极大,严重影响到阈值的选取,使寻找噪声频率点失败,因此,首先将零频附近的频谱置为 0;然后将全息图平均分为 4 个区,再将每个小区平均分为 4 个区,即将全息图共分成 16 个区。由于斜条纹噪声在频域表现为对称性,因此只需对一半的频谱定位,然后根据对称性算出相应的位置。

3) 设定分区阈值。一幅图的频谱一般有如下特点:

① 能量主要集中在零频附近,反映了图像的大体框架;

② 剩余的能量分布在高频部分,反映了图像中的细节、边缘等。

目前,由于受到 CCD 尺寸的限制,使得频域中的高频部分不会出现较高的幅度谱。因此将理想全息图频谱看作一个三维指数曲面。确定频率中心的阈值 T 为

$$T = a^{d_{ij}}, \quad (2)$$

式中

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{(x_0^2 + y_0^2)^2}{(x_1^2 + y_1^2)^2}}, \quad (3)$$

其中 a 控制着三维曲面的坡陡程度,对能否找到斜条纹噪声频率中心有着至关重要的作用。经大量实验验证, a 取 $2 \sim 2.3$ 能够得到比较合理的阈值, i, j 为分区索引, d_{ij} 为 (i, j) 分区中心到零频点相对距离的倒数, x_0, y_0 为零频点的坐标, x_1, y_1 为分区中心点的坐标。

4) 斜条纹噪声定位。对于每个分区 (i, j) , 首先寻找其最大值 $V_{\max_{ij}}$, 并计算分区均值 $V_{\text{mean}_{ij}}$, 若 $V_{\max_{ij}} / V_{\text{mean}_{ij}} > T$, 则说明该点是异常点, 将其作为斜条纹频率位置, 将 $V_{\max_{ij}}$ 对应分区索引转化为全局索引 n_x, n_y , 并记录。然后通过高斯陷波滤波器滤除; 若有与此周期斜条纹方向相近的非周期斜条纹噪声, 将 n_x, n_y 修正, 使其大致在非周期噪声斜条纹对应的频域亮线上(经大量实验验证, 若 n_x, n_y 离零频点相对比较近, 则 n_x 补偿 10 个像素点左右即可,

反之, 则 n_y 补偿 28 个像素点左右即可), 然后根据修正的频率点计算频域亮线的近似斜率 k , 并根据直线方程求得亮线与第一行和最后一行的交点的列索引, 分别记作 y_{Y_1}, y_{Y_M} , 然后对 (y_{Y_1}, y_{Y_M}) 区间内直线上大于全局均值的点再次利用自定义滤波器滤除; 重新在该区寻找 $V_{\max_{ij}}$ 和计算其均值 $V_{\text{mean}_{ij}}$, 直到 $V_{\max_{ij}} / V_{\text{mean}_{ij}} < T$ 。其中高斯陷波滤波器模板计算公式可表示为

$$H(i, j) = 1 - \exp\left[-\frac{D_1(i, j)D_2(i, j)}{4d_0^4}\right], \quad (4)$$

$$D_1(i, j) = \sqrt{(i - n_x)^2 + (j - n_y)^2}, \quad (5)$$

$$D_2(i, j) = \sqrt{(i + n_x - 2x_0)^2 + (j + n_y - 2y_0)^2}, \quad (6)$$

式中 d_0 为截止频率。然后将上述得到的模板与频谱点乘。因为噪声频率和有用信息混合在一起, 即在有噪声频率存在的位置, 有用信息同样存在。因此将相乘后频谱噪声频率中心点的幅值取其周围幅值的平均值作为补偿。

滤除非周期斜条纹噪声时, 局部陷波滤波器尺寸为 $(2s+1) \times 5$, 其中

$$s = \begin{cases} |\text{round}(k)|/2 + 1, & \text{round}(k) \text{ is even} \\ \lceil |\text{round}(k)| + 1 \rceil / 2, & \text{round}(k) \text{ is odd} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\text{round}(k)$ 表示对 k 取四舍五入。

由于非周期斜条纹噪声的频域响应亮线具有一定的宽度, 那么自定义滤波器模板应满足靠亮线近的谱值消弱得大些, 反之消弱得小些。因此自定义模板取值可表示为

$$S_{\text{MSK}} = \text{repmat}([0.8, 0.5, 0.5, 0.5, 0.8], 2s+1, 1), \quad (8)$$

即将向量 $[0.8, 0.5, 0.5, 0.5, 0.8]$ 复制 $2s+1$ 行。最后将处理后的幅度谱与相位谱点乘返回主程序继续下面的工作, 或逆变换显示去噪全息图。

4 实验结果与分析

实验环境为 Matlab 7.11.0 版本, 实验图像采用全息相机系统一次测试过程中拍摄的全息视频图像, 选取其中比较有代表性的 3 张全息图作为实验对象。为了更好说明本方法的有效性, 对 3 幅全息图的重建效果进行了比较。由于本方法是在频域处理噪声, 为了减少运行时间, 实验采用角谱重建方法^[10-11], 参考光波长为 532.8 nm, CCD 像素尺寸为 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$ 。

图像的均值反映了图像的总能量，信噪比(SNR)是局部极大方差和局部极小方差比值取 dB 值,然后加以修正,修正式为 $1.04b-7$,其中 b 为未修正的 SNR,即局部放大方差与局部极小方差比。本文选择这两个指标作为评价重建像质量。

实验 1:图 1 只含有低频周期斜条纹噪声,尺寸为 985×1053 ,重建距离为 265 mm。其原始重建像如图 7(a)所示,可以看出斜条纹噪声的存在严重影响了全息图重建像的质量。经多次实验验证, d_0 取 3, a 取 2.1,利用本文方法找到的周期斜条纹噪声中心坐标索引为(457,508)。利用本文方法寻找噪声频率中心和利用文献[8]方法滤除斜条纹噪声后全

息图重建像如图 7(b)所示,利用本文方法寻找噪声频率中心和滤除斜条纹噪声后的全息图重建像如图 7(c)所示,从图 7(b)和 7(c)可以看出斜条纹已经被完全消除,从主观上看没有太大的差别,这说明准确定位噪声频率中心对于滤除周期斜条纹噪声非常重要。表 1 为对图 1 未去噪,采用文献[8]方法去噪的和采用本文方法去噪后重建像的效果比较。从表 1 可以看出,无论是文献[8]方法还是本文方法,重建像的均值都比原始重建像小,SNR 都比原始重建像高,而本方法均值在与文献[8]方法相差不大的情况下,SNR 要比文献[8]高,这说明本文方法比文献[8]方法能更有效地滤除周期斜条纹噪声和保留有用信息。

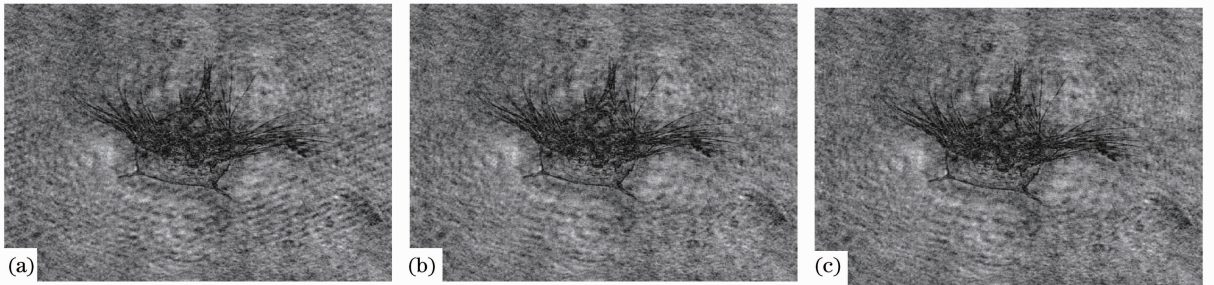


图 7 不同去噪方法下图 1 原始的重建像。(a)图 1 重建像;(b)经文献[8]方法滤除噪声后的图 1 的重建像;(c)经本文方法滤除噪声后的图 1 重建像

Fig. 7 Reconstructed images of Fig. 1 denoising by different methods. (a) Original reconstructed image of Fig. 1; (b) reconstructed image of Fig. 1 after processing by Ref. [8] method.; (c) reconstructed of Fig. 1 after processing by the method proposed in this paper

表 1 图 7 中各重建像的效果比较

Table 1 Comparison of reconstructed images in Fig. 7

| | Mean value | SNR /dB |
|-----------|------------|---------|
| Fig. 7(a) | 78.6170 | 13.8874 |
| Fig. 7(b) | 78.3694 | 16.8832 |
| Fig. 7(c) | 78.3426 | 16.9026 |

实验 2:图 2 含有高频和低频周期斜条纹噪声,尺寸为 605×735 ,重建距离为 111 mm。其原始重建像如图 8(a)所示,可以看出斜条纹噪声的存在严重影响了全息图重建像的质量,与图 1 相比表现没有那么强烈。经多次实验, d_0 取 4, a 取 2,利用本文方法找到的高频周期斜条纹噪声中心为(369,41)和(539,328),低频周期噪声频率中心为(237,327)。只

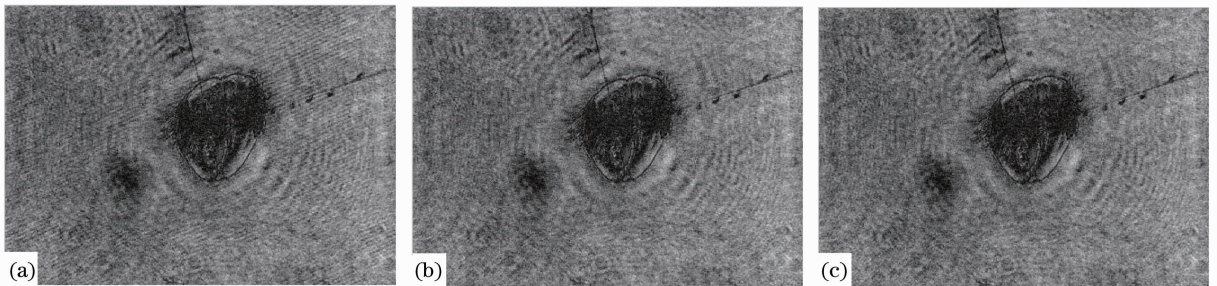


图 8 滤除不同类型周期斜条纹噪声下图 2 的重建像。(a)图 2 原始重建像;(b)经文献[8]方法滤除噪声后的图 2 的重建像;(c)经本文方法滤除噪声后的图 2 重建像

Fig. 8 Reconstructed images of Fig. 2 under removal different periodic oblique stripe noises. (a) Original reconstructed image of Fig. 2; (b) reconstructed image of Fig. 2 after processing by Ref. [8] method; (c) reconstructed of Fig. 2 after processing by the method proposed in this paper

滤除低频周期斜条纹噪声后全息图重建像如图 8(b) 所示, 滤除斜条纹低频和高频斜条纹噪声后的全息图重建像如图 8(c) 所示。从主观上看, 图 8(b) 已经不含有什么斜条纹, 图 8(c) 与之比较没有太大区别。表 2 为对图 2 未去噪, 只滤除低频周期斜条纹噪声的和滤除低频及高频周期噪声后重建像的效果比较。从表 2 可以看出, 在滤除低频周期噪声后再滤除高频周期斜条纹噪声时, 重建像的均值继续减少, 而 SNR 却增加了 0.2108 dB, 这说明高频周期斜条纹噪声虽然在图像中表现不明显, 但影响着图像的质量, 进一步证明了本文方法对滤除周期斜条纹噪声的有效性。

表 2 图 8 中各重建像的效果比较

Table 2 Comparison of reconstructed images in Fig. 8

| | Mean value | SNR /dB |
|-----------|------------|---------|
| Fig. 8(a) | 138.5242 | 6.7958 |
| Fig. 8(b) | 138.1580 | 8.0226 |
| Fig. 8(c) | 138.1394 | 8.2334 |

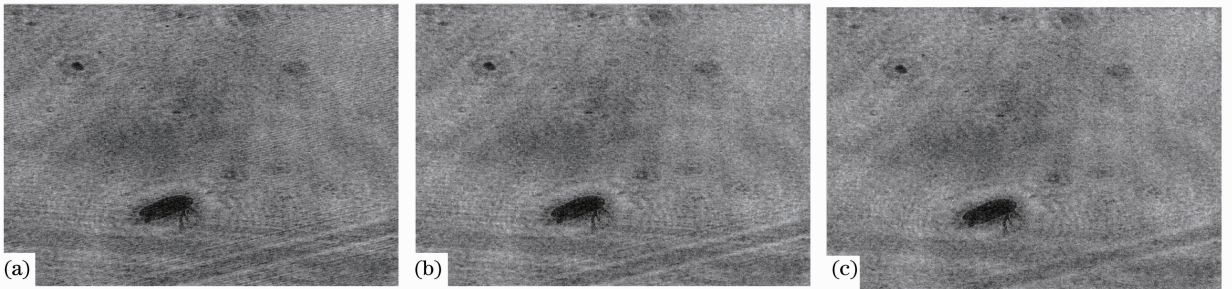


图 9 抑制不同类型斜条纹噪声下图 5 的重建像。(a) 图 5 原始重建像; (b) 经文献[8]方法滤除噪声后的图 5 的重建像; (c) 经本文方法滤除噪声后的图 5 重建像

Fig. 9 Reconstructed images of Fig. 5 under suppressing different oblique stripe noises. (a) Reconstructed image of Fig. 5; (b) reconstructed image of Fig. 5 after processing by Ref. [8] method; (c) reconstructed of Fig. 5 after processing by the method proposed in this paper

表 3 图 9 中各重建像的效果比较

Table 3 Comparison of reconstructed images in Fig. 9

| | Mean value | SNR /dB |
|-----------|------------|---------|
| Fig. 9(a) | 166.4159 | 8.2446 |
| Fig. 9(b) | 165.8026 | 6.8250 |
| Fig. 9(c) | 165.6420 | 6.9640 |

从实验 1~3 去噪效果上看, 本文提出的自动定位噪声频率中心的方法是比较有效的, 本文高斯方法滤除周期斜条纹噪声比文献[8]置零方法效果更好; 本文提出的局部陷波滤波器对非周期斜条纹噪声的抑制效果明显。从三次实验还可以看出 d_0 的取值和低频周期斜条纹噪声频率中心与零频的距离有关, 距离越小, d_0 的取值越小。

实验 3: 图 5 含有周期和非周期斜条纹噪声, 尺寸为 1500×1104 , 重建距离为 179 mm。其原始重建像如图 9(a) 所示, 可以看出斜条纹噪声的存在严重影响了全息图重建像的质量, 且在重建像中斜条纹更加不明显。经多次实验, d_0 取 6, a 取 2.3, 利用本文方法找到的高频周期斜条纹噪声中心为 (860, 42) 和 (1392, 513), 低频周期噪声频率中心为 (642, 512)。滤除周期斜条纹噪声后全息图重建像如图 9(b) 所示, 滤除周期斜条纹噪声和非周期斜条纹噪声后的全息图重建像如图 9(c) 所示, 图 9(b) 与图 9(c) 相比, 图 9(c) 中的非周期斜条纹噪声得到了很好的抑制。表 3 为对图 5 未去噪, 滤除周期斜条纹噪声的和滤除周期及非周期斜条纹噪声后重建像的效果比较。由表 3 可以看出图 9(c) 的 SNR 比图 9(b) 高, 而均值却比图 9(b) 小, 说明非周期噪声较大程度上影响了重建像的质量, 进一步证明了本文算法对抑制非周期斜条纹噪声的有效性。

5 结 论

频域方法滤除斜条纹噪声至关重要的一步是准确定位斜条纹频率位置, 针对全息图, 提出一种自动定位频率中心抑制斜条纹噪声的算法, 该算法利用局部阈值法确定周期斜条纹噪声频率中心, 通过平滑性较好的高斯带阻滤波器对其进行滤除, 再通过直线方程模拟非周期斜条纹噪声频率的位置, 然后采用自定义模板滤波器进行滤除。从实验结果中可以看到, 该方法能比较准确地定位噪声频率位置, 能滤除全息图中不同频率的周期斜条纹噪声和较大程度地抑制非周期斜条纹噪声, 从而较好地保持有用信息。同时证明了本文算法比文献[8]方法更有效。

参 考 文 献

- 1 Chen Ning. Researches on Digital Holography [D]. Guangzhou: Jinan University, 2004.
陈 宁. 数字全息技术研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2004.
- 2 Wang Yanping. Studies of Some Basic Issues in Digital Holography [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004.
王艳萍. 数字全息术中一些问题的初步研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- 3 Wang Cunshuai, Zhang Yinke, Hao Jinbo, *et al.*. Improving reconstruction image quality of digital holography using median filter and intensity subtraction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(12): 120901.
王存帅, 张引科, 郝劲波, 等. 用中值滤波和光强相减法改善数字全息再现像质量[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(12): 120901.
- 4 Wang Fengpeng, Xie Xiaochun, Xie Yingmao, *et al.*. Auto-focusing for digital in-line holography and fusion of reconstructed image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040901.
王凤鹏, 谢晓春, 谢应茂, 等. 同轴数字全息自动聚焦与再现像的融合 [J]. *激光光电子学进展*, 2012, 49(4): 040901.
- 5 Zou Yuanyuan, Ge Qingping, Han Yu, *et al.*. Stripe noise of THz image processing based on frequency filtering [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(17): 241-243.
邹园园, 葛庆平, 韩 煜, 等. 基于频域滤波的 THz 图像斜条纹噪声处理[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(17): 241-243.
- 6 Kou Guangjie, Wang Zhensong, Yao Ping. Filtering methods for different characteristic stripe noise in SAR image [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(1): 1-12.
寇光杰, 王贞松, 姚 萍. SAR 图像中不同特性条纹噪声的滤除 [J]. *遥感学报*, 2011, 15(1): 1-12.
- 7 Han Ling, Dong Lianfeng, Zhang Min, *et al.*. Destriping hyperspectral image based on an improved moment matching method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3333-3338.
韩 玲, 董连凤, 张 敏, 等. 基于改进的矩匹配方法高光谱影像条带噪声滤波技术 [J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3333-3338.
- 8 H Sun, P W Bevie, N Burns, *et al.*. Underwater digital holography for studies of marine plankton [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2008, 366(1871): 1789-1806.
- 9 H Sun, D C Hendry, M A Player, *et al.*. In situ underwater electronic holographic camera for studies of plankton [J]. *IEEE J Oceanic Engineering*, 2007, 32(2): 373-382.
- 10 Li Junchang. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1163-1167.
李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用 [J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1163-1167.
- 11 Zheng Chujun, Han Peng, Li Rong, *et al.*. Theoretical analysis for numerical reconstruction of off-axis digital hologram based on angular apectrum diffraction [J]. *Laser Journal*, 2006, 27(1): 44-45.
郑楚君, 韩 鹏, 李 榕, 等. 基于角谱衍射的离轴数字全息数值重建理论分析 [J]. *激光学报*, 2006, 27(1): 44-45.

栏目编辑: 何卓铭