

# 粒子群优化的 Contourlet 域数字全息 再现像增强

吴一全<sup>1,2</sup> 殷 骏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 210016)

(<sup>2</sup> 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068)

**摘要** 对数字全息再现像存在对比度低、边缘纹理不清晰、含散斑噪声等问题,提出了基于均匀搜索粒子群优化的 Contourlet 域数字全息再现像自适应增强方法。利用中值滤波算法抑制再现像中的散斑噪声,经 Contourlet 分解后,对带通方向子带利用非线性增益函数进行边缘增强;低通子带系数的调整则依据基于灰度级变换和局部均值的增益函数,其中灰度级变换使图像暗区扩展,利用均匀搜索粒子群优化搜寻待定参数,适应度函数兼顾了图像的对比度、清晰度及峰值信噪比。大量实验结果表明,与现有的三种增强方法相比,该方法能更有效地提高数字全息再现像的对比度和清晰度,突出边缘纹理并抑制散斑噪声,提高数字全息测量的准确度。

**关键词** 全息; 图像自适应增强; Contourlet 变换; 灰度级变换; 均匀搜索粒子群优化; 散斑噪声

**中图分类号** O438.1; TN911.73; TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0809002

## Reconstructed Image Enhancement of Digital Holography in Contourlet Domain Based on Particle Swarm Optimization

Wu Yiquan<sup>1,2</sup> Yin Jun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing, Jiangsu 210016, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an, Shaanxi 710068, China

**Abstract** Aiming at the problem of low contrast, blurred edges and textures, and speckle noise of reconstructed image in digital holography, an adaptive enhancement method for reconstructed image of digital holography in contourlet domain based on uniform searching particle swarm optimization is proposed. Median filtering algorithm is used to suppress speckle noise of the reconstructed image. After the contourlet decomposition, edge enhancement is performed for the band-pass directional subbands by a nonlinear gain function. While the coefficients of low-pass subbands are adjusted by the gain function based on a gray-scale transform and the local mean. The gray-scale transform aims to expand the dark areas of digital holographic image. The undetermined parameters are found by uniform searching particle swarm optimization. The fitness function takes into account the contrast, definition and peak signal-to-noise ratio of image. A large number of experimental results show that, compared with three existing enhancement methods, the proposed method can more effectively improve the contrast and definition of reconstructed image in digital holography, highlight edges and textures, and suppress speckle noise. As a result, the measurement accuracy of digital holography can be improved.

**Key words** holography; adaptive image enhancement; contourlet transform; gray-scale transform; uniform searching particle swarm optimization; speckle noise

**OCIS codes** 090.1995; 100.2980; 110.6980; 110.7410

收稿日期: 2013-01-28; 收到修改稿日期: 2013-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(60872065)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLS201007)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 吴一全(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事数字全息和图像处理等方面的研究。

E-mail: nuuaimage@163.com

# 1 引 言

数字全息利用光电传感器件(如 CCD 或 CMOS)以数字化的方式记录全息干涉图的强度信息,并用计算机模拟光学衍射过程来实现被记录物体的全息再现和处理。数字全息术广泛应用于显微观测、粒子场测定、三维物体识别、生物医学、形变检测、图像加密等领域<sup>[1-7]</sup>。然而,数字全息术仍存在一些困难,其中再现像的像质是关键问题,直接影响后续测量的精度,国内外学者对此做了大量研究。全息再现过程中,由于受到激光散斑的影响,形成严重的散斑乘性噪声。该噪声覆盖了物像的纹理细节,大大影响了数字全息再现像的像质<sup>[8]</sup>。现有的再现像改善方法<sup>[9-10]</sup>可较为有效地抑制散斑噪声,然而物像的纹理细节较为模糊,且图像的对比度与清晰度低。因此,必须对数字全息再现像进行增强处理,提高其对比度及纹理清晰度。现有的图像增强方法可划分为空间域和变换域两类方法。空间域方法直接对图像进行处理<sup>[11-13]</sup>,在提升图像对比度的同时,放大了噪声,且适用范围较小。近年来,人们更多地研究基于变换域<sup>[14-17]</sup>的图像增强方法。其中,Contourlet 变换是图像增强领域的研究热点<sup>[18-19]</sup>,它是一种具有局部性、多方向性特征的多尺度分析方法。基于 Contourlet 变换的图像增强方法可以突出目标的边缘细节。此外,为了提高上述增强方法的自适应性,可考虑采用遗传算法<sup>[20]</sup>、粒子群优化(PSO)算法<sup>[21]</sup>等智能优化算法对增强方法中的参数进行自适应调整,以便对不同图像均能取得最佳的视觉效果。

为改善数字全息再现像的像质,本文利用中值滤波算法抑制散斑噪声,提出了基于均匀搜索粒子群优化(UPSO)的 Contourlet 域数字全息再现像自适应增强方法。首先对中值滤波后的再现像进行 Contourlet 分解,产生方向带通子带和低通子带,然后对方向带通子带采用非线性增益函数对边缘细节进行增强,同时避免散斑噪声的放大;低通子带系数则采用基于灰度级变换和局部均值的增益函数进行调整,增益函数中,不同的待定参数会导致图像的增强效果差异巨大,因此利用粒子群算法对待定参数进行寻优。采用 UPSO 算法<sup>[22]</sup>快速准确地搜寻待定参数。UPSO 算法的适应度函数兼顾了对比度增益、清晰度增益和峰值信噪比(PSNR)等三项客观定量评价指标。列举了利用 UPSO 算法的 Contourlet 域数字全息再现像增强方法步骤,并利用该方法及三种其他增强方法对中值滤波后的再现

像进行了增强处理,给出了各方法增强后的图像及其相应的对比度增益、清晰度增益和峰值信噪比三项客观定量指标,并依据实验结果做了比较。

## 2 基于 Contourlet 变换的数字全息再现像增强方法

### 2.1 数字全息再现像的去噪处理

激光的高度相关性和物体表面组织的粗糙,均会引起激光散斑效应。散斑噪声在数字全息再现像中表现为颗粒状,覆盖了物像的纹理细节,大大影响了再现像的像质。现采用中值滤波算法抑制散斑噪声,中值滤波器的大小为  $5 \times 5$ 。经中值滤波后,散斑噪声将得到有效抑制,然而会使物像的边缘和纹理细节变得模糊,因此还需要进行增强处理。

### 2.2 Contourlet 变换

Contourlet 变换是一种多尺度、多方向分析方法,也称为塔型方向滤波器组(PDFB)。图 1 给出了 Contourlet 滤波器组对图像进行分解的流程<sup>[18]</sup>。与二维小波变换相比,Contourlet 变换能分解出更多的方向子带,可更好地描述图像边缘和方向性纹理信息。

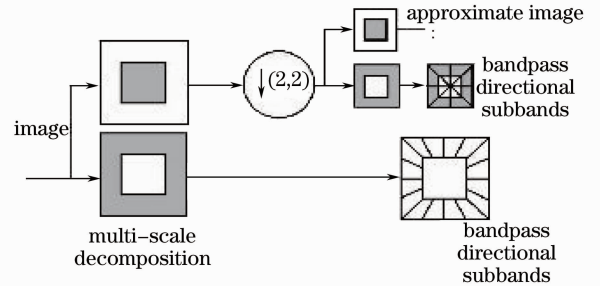


图 1 Contourlet 滤波器组

Fig. 1 Contourlet filter bank

### 2.3 带通方向子带系数调整

中值滤波后的数字全息再现像经 Contourlet 分解,产生的带通方向子带包含了大量的边缘、细节信息和极少量散斑噪声。由于散斑噪声不同于一般噪声,引起的梯度变化较小,相应的 Contourlet 系数数值较大,对带通方向子带采用阈值去噪方法时,会损失物像的边缘细节。因此仅对带通方向子带进行增强处理,增益函数如下:

$$G_k^s(x, y) = a \max(f_k^s) \{ \text{sigm}\{c[f_k^s(x, y)/\max(f_k^s) - b]\} - \text{sigm}\{-c[f_k^s(x, y)/\max(f_k^s) + b]\} \}, \quad (1)$$

式中  $f_k^s(x, y)$  是  $k$  尺度、第  $s$  个带通方向子带中  $(x, y)$  处的系数,  $G_k^s(x, y)$  是调整后与之相应的系数,

$\max(f_k)$  是该方向子带上系数的最大值,

$$\text{sigm}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)},$$

$$a = \frac{1}{\text{sigm}[c(1-b)] - \text{sigm}[-c(1+b)]},$$

$c$  控制增强的幅度, 取 40,  $b$  控制增益曲线的形状, 取 0.2。

## 2.4 低通子带系数调整

经 Contourlet 分解后的低通子带包含数字全息再现像的大量基本信息, 且子带中基本滤除了噪声, 对其系数的调整主要影响到再现像的对比度。因此对低通子带采用基于灰度级变换和局部均值的对比度增强方法。

假设原始图像经 Contourlet 变换后的低通子带系数为  $d(x, y)$ , 其最大值及最小值分别为  $d_{\max}$  和  $d_{\min}$ , 局部均值  $m(x, y)$  为

$$m(x, y) = \frac{1}{n_L} \sum_{(i, j) \in N_L} d(i, j), \quad (2)$$

式中  $N_L$  为低通子带系数  $d(x, y)$  的邻域, 取  $5 \times 5$  的窗口,  $n_L$  为邻域内的系数个数, 取 25。

低通子带系数调整公式为

$$D(x, y) = k_1[d(x, y) - m(x, y)] + T[m(x, y)], \quad (3)$$

式中  $D(x, y)$  为调整后的低通子带系数;  $k_1$  是低通子带内用以增强数字全息再现像细节的系数, 为防止出现过增强现象, 取值范围是 (1, 3);  $T(\cdot)$  是灰度级变换函数, 针对数字全息再现像的特点, 采取暗区扩展、亮区不变的变换函数, 以得到最佳的增强效果。对局部均值的变换如下:

$$T[m(x, y)] =$$

$$\begin{cases} k_2 m(x, y), & m(x, y) < T_L \\ m(x, y) - T_L + k_2 T_L, & m(x, y) \geq T_L \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $k_2 \in (1, 5)$ ,  $T_L \in (d_{\min}, d_{\max})$ , 均为待定参数。

## 3 利用 UPSO 算法的增强方法实现

### 3.1 UPSO 算法

设在  $n^*$  维解空间中, 第  $l$  个粒子的速度  $\mathbf{V}_l = (V_{l1}, V_{l2}, \dots, V_{ln^*})$  代表该粒子在搜索空间单位迭代次数的位移, 该粒子的位置  $\mathbf{X}_l = (X_{l1}, X_{l2}, \dots, X_{ln^*})$ , 目标函数值作为适应度。每次迭代, 粒子  $l$  通过跟踪其局部极值  $\mathbf{P}_l(t)$  和粒子群的全局极值  $\mathbf{G}(t)$  更新速度和位置, 粒子迭代公式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_l(t+1) &= \omega \mathbf{V}_l(t) + r_1[r_2 \mathbf{P}_l(t) + \\ &\quad (1 - r_2) \mathbf{G}(t) - \mathbf{X}_l(t)], \end{aligned}$$

$$\mathbf{X}_l(t+1) = \mathbf{X}_l(t) + \mathbf{V}_l(t+1), \quad (5)$$

式中  $r_1$  是学习系数,  $r_2$  是  $[0, 1]$  上均匀分布的随机数。

令  $P_l$  和  $G$  分别为粒子搜寻某一参数时的局部最优解和全局最优解, 且  $P_l < G$ , 则粒子搜索中心的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} 1, & P_l \leq x \leq G \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (6)$$

因此, 粒子的搜索中心在局部极值与全局极值间均匀分布, 避免了围绕局部极值搜索, 有较好的全局搜索能力。与基本 PSO 算法相比, 收敛速度快、搜索精度高, 且减少了调整参数, 进一步简化了基本 PSO 算法的迭代公式, 提高了粒子的搜索效率。

### 3.2 图像质量评价准则和适应度函数

为了正确评价图像质量的好坏及处理方法的优劣, 需要可靠的客观定量评价方法。客观评价虽然操作简单、结果明确, 但尚无统一的标准。本文针对数字全息再现像, 选用对比度增益、清晰度增益、峰值信噪比等三种客观定量评价函数作为增强后图像质量的评价准则。

假设大小  $M \times N$  的原始图像为  $I(x, y)$ , 增强后的图像为  $I_E(x, y)$ 。则分别定义对比度增益  $E_1$ 、清晰度增益  $E_2$ 、峰值信噪比  $E_3$  三种评价函数为

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{[1/(MN)] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_E^2(i, j) - \left| [1/(MN)] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_E(i, j) \right|^2}{[1/(MN)] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I^2(i, j) - \left| [1/(MN)] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j) \right|^2}, \\ E_2 &= \frac{[1/(MN)] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{[\Delta I_{E,x}(i, j)]^2 + [\Delta I_{E,y}(i, j)]^2}}{[1/(MN)] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{[\Delta I_x(i, j)]^2 + [\Delta I_y(i, j)]^2}}, \\ E_3 &= 10 \lg \frac{M \times N \times 255 \times 255}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i, j) - I_E(i, j)]^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta I_{E,x}(i,j) &= I_E(i,j) - I_E(i-1,j), \\ \Delta I_{E,y}(i,j) &= I_E(i,j) - I_E(i,j-1), \\ \Delta I_x(i,j) &= I(i,j) - I(i-1,j), \\ \Delta I_y(i,j) &= I(i,j) - I(i,j-1). \end{aligned} \quad (8)$$

为了利用 UPSO 算法搜寻低通子带增益函数中待定参数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $T_L$  的最优值,需要选取适当的适应度函数,以达到最佳的增强效果。通过对大量数字全息再现像进行实验,当(3)式中  $k_1 = 1$ ,  $T[m(x,y)] = m(x,y)$  时,增强后图像的峰值信噪比近似达到最大值,记为  $R_{MAX}$ 。为了实现对数字全息再现像的自适应增强,并兼顾对比度增益、清晰度增益、峰值信噪比等三项定量评价指标,选取如下适应度函数:

$$F = \begin{cases} 0, & E_3 < \alpha \cdot R_{MAX} \\ E_1 \cdot E_2, & \text{else} \end{cases}, \quad (9)$$

式中参数  $\alpha$  控制图像的失真程度,取 0.9。

### 3.3 利用 UPSO 算法的 Contourlet 域数字全息再现像增强步骤

利用 UPSO 算法,在 Contourlet 域增强数字全息再现像的步骤如下:

- 1) 对经中值滤波后的数字全息再现像进行 Contourlet 分解,产生一个低通子带和一系列带通方向子带。根据(1)式对带通方向子带系数进行调整。
- 2) (3)式中选取  $k_1 = 1$ ,  $T[m(x,y)] = m(x,y)$ ,并依据(2)~(4)式调整低通子带系数,计算峰值信噪比的近似最大值  $R_{MAX}$ 。
- 3) 初始化粒子群。随机产生 20 个粒子,搜索参数  $k_1$  和  $k_2$  时,粒子速度在  $[-0.1, 0.1]$  上随机产生,

参数  $T_L$  的搜索速度则在  $[-10, 10]$  上随机产生。

4) 根据(2)~(4)式和粒子群目前搜索到的参数值,对低通子带系数进行调整,经 Contourlet 反变换后,根据(7)~(9)式计算每个粒子的适应度,适应度越大,粒子搜索到的解越优,找出各粒子和整个粒子群的最优解。

5) 根据(5)式更新每个粒子的位置和速度;

6) 若满足最大迭代次数 20,则停止迭代,输出最优解,并对数字全息再现像进行增强处理;否则转 3)。

## 4 实验结果与分析

采用本文提出的基于均匀搜索粒子群优化的 Contourlet 域数字全息再现像自适应增强方法,对大量数字全息再现像进行了实验。由于篇幅限制,现以其中的两幅数字全息再现像为例加以说明,这两幅图像均含有大量散斑噪声,并且对比度弱、清晰度低,需要对图像进行适当的增强处理,以取得最佳的视觉效果。依据主观视觉评价和对比度增益、清晰度增益、峰值信噪比等三种客观定量评价函数,将本文方法与现有的双向直方图均衡<sup>[12]</sup>、平稳小波变换和 Retinex<sup>[15]</sup>、NSCT<sup>[19]</sup> 等三种其他增强方法进行了比较。图 2 和图 3 分别给出了原始图像(a)、中值滤波后图像(b)及对中值滤波后图像采用双向直方图均衡方法(c)、平稳小波变换和 Retinex 方法(d)、NSCT 方法(e)及本文方法(f)所得到的增强后图像。上述方法均是在 Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU 2.10 GHz 主频、2 GB 内存、Matlab2009a 环境中运行的。

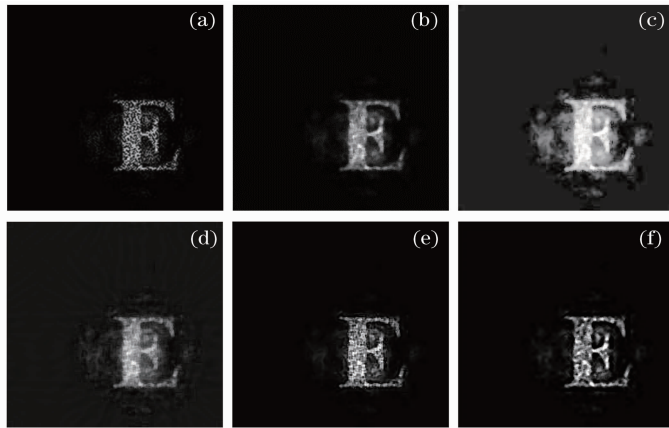


图 2 数字全息再现像 1 的四种增强方法结果。(a) 原始图像;(b) 中值滤波后图像;(c) 双向直方图均衡方法;(d) 平稳小波变换和 Retinex 方法;(e) NSCT 方法;(f) 本文方法

Fig.2 Results of four enhancement methods for reconstructed image of digital holography 1. (a) Original image; (b) image by median filtering; (c) histogram double equalization method; (d) stationary wavelet transform and retinex method; (e) NSCT method; (f) proposed method

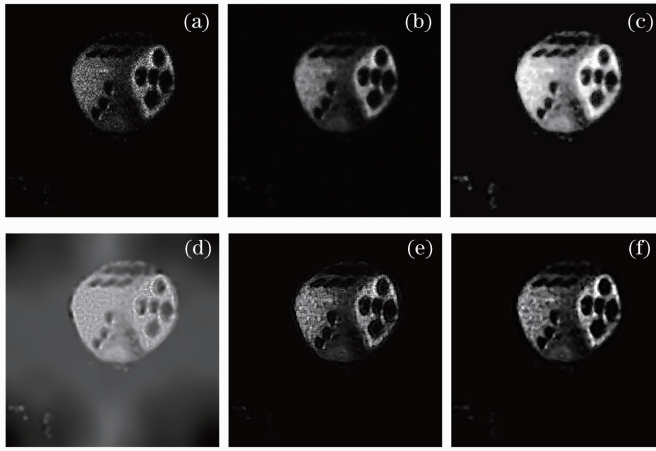


图 3 数字全息再现像 2 的四种增强方法结果。(a) 原始图像;(b) 中值滤波后图像;(c) 双向直方图均衡方法;  
(d) 平稳小波变换和 Retinex 方法;(e) NSCT 方法;(f) 本文方法

Fig. 3 Results of four enhancement methods for reconstructed image of digital holography 2. (a) Original image; (b) image by median filtering; (c) histogram double equalization method; (d) stationary wavelet transform and retinex method; (e) NSCT method; (f) proposed method

由图 2 和图 3 可以看出,数字全息再现像经中值滤波后,物像的边缘细节模糊,视觉效果不佳,采用上述四种方法增强中值滤波后图像发现:双向直方图均衡方法在增强数字全息再现像全局对比度的同时,也放大了噪声,且该方法会产生过增强的现象,导致再现像整体过亮,部分纹理细节模糊甚至丢失。采用基于平稳小波变换和 Retinex 的增强方法时,纹理边缘模糊,且图像偏灰,这是由于该方法的目的是改善图像亮度的均匀性,亮度过度增强导致再现像严重失真,视觉效果不佳。采用 NSCT 方法时,图像纹理细

节较为明显,其清晰度有了很大提升,较前两种方法优势明显,然而并未有效提升物像的对比度,散斑噪声被放大,不是最优的增强方法。利用本文方法增强后的数字全息再现像视觉效果最佳,边缘细节最为清晰,有效地增强了数字全息再现像的对比度和纹理清晰度,避免了散斑噪声的放大。与 NSCT 方法相比,物像表面较为平滑,其光亮度也有了提高。

依据(7)式计算了数字全息再现像经四种方法增强后的对比度增益、清晰度增益及峰值信噪比,如表 1 所示。

表 1 本文方法与现有方法的定量指标评价

Table 1 Quantitative index evaluation of the proposed method with existing methods

Experimental image	Index evaluation	Histogram double equalization method	Stationary wavelet transform and retinex	NSCT method	Proposed method
Image 1	Contrast gain	3.14	1.32	1.18	2.21
	Definition gain	1.93	1.55	2.16	2.43
	PSNR	36.13	25.53	71.09	60.87
Image 2	Contrast gain	4.60	2.16	1.15	2.65
	Definition gain	2.02	1.71	2.24	2.36
	PSNR	16.59	26.19	71.98	59.52

由表 1 可以看出:双向直方图均衡方法的峰值信噪比很小,说明引入较多的噪声,对比度增益和清晰度增益偏大,过度地加大了数字全息再现像的全局对比度,说明出现过增强现象,影响了图像的视觉效果;采用基于平稳小波变换和 Retinex 的方法,清晰度增益和峰值信噪比均相对较小,说明数字全息再现像存在失真,视觉效果不佳。与平稳小波变换和 Retinex 方法相比,NSCT 方法的清晰度有了很大提升,说明对再现像的边缘、纹理细节增强效果更好,然而

NSCT 方法的对比度增益略大于 1,说明对图像的对比度并未改善。本文方法的峰值信噪比较高,对比度较平稳小波变换和 Retinex、NSCT 两种增强方法有了明显提高,清晰度则优于其余三种增强方法。与 NSCT 方法相比,对比度增益指标大大增加,其清晰度增益指标也得到了提升,说明本文方法进一步改善了物像的对比度和清晰度。

综合来看,本文方法对数字全息再现像的增强效果最佳,不仅能突出数字全息再现像的边缘细节,而

且避免了散斑噪声的放大,在保持一定峰值信噪比的同时,大大改善了物像的对比度。

## 5 结 论

提出了一种基于均匀搜索粒子群优化的 Contourlet 域数字全息再现像自适应增强方法。利用中值滤波算法抑制数字全息再现像中的散斑噪声,中值滤波后图像经 Contourlet 变换分解成一个低通子带和若干带通方向子带。在带通方向子带中采用非线性增益函数对边缘细节进行增强,同时避免散斑噪声的放大;低通子带中,通过选取基于灰度级变换和局部均值的对比度增益函数调整子带系数,针对数字全息再现像,灰度级变换采用亮区不变、暗区扩展的方法,且对增益函数中涉及的待定参数采用 UPSO 算法进行寻优,其中的适应度函数兼顾了对比度增益、清晰度增益、峰值信噪比等三项客观定量评价指标。对大量数字全息再现像进行的增强实验结果表明,与双向直方图均衡、平稳小波变换和 Retinex、NSCT 等三种增强方法相比,本文提出的方法优势明显,能有效地提高数字全息再现像的对比度,增强后物像的边缘、纹理细节更为清晰,抑制散斑噪声的放大,适当提升了物像的亮度,视觉效果更好。利用该方法可有效提高数字全息术测量的准确度。

## 参 考 文 献

- Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0309002.  
马利红, 王 辉, 金洪震, 等. 数字全息显微定量相位成像的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0309002.
- Li Guangyong, Yang Yan. Digital holography particle image velocimetry applied for measurement of the rotating flow fields [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0609001.  
李光勇, 杨 岩. 数字全息成像方法数字全息粒子图像测速技术应用于旋转流场测量的研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0609001.
- M Kroll, L Muhlfield, D Block. Stereoscopic digital holography [J]. IEEE Trans Plasma Science, 2010, 38(4): 897-900.
- Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui, *et al.*. Image-plane digital holography for quantitative imaging of cells of Chinese medical decoction pieces [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0209002.  
王华英, 郭中甲, 张志会, 等. 基于像面数字全息术的中药饮片细胞定量成像技术研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0209002.
- Pan Feng, Xiao Wen, Liu Shuo. Digital holographic microscopy for long term quantitative phase-contrast imaging of living cells [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0509001.  
潘 锋, 肖 文, 刘 烁. 一种适用于长期定量观察生物活细胞的数字全息显微方法 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0509001.
- P Psota, V Ledl, R Dolecek, *et al.*. Measurement of piezoelectric transformer vibrations by digital holography [J]. IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2012, 59(9): 1962-1968.
- Zhu Zhuqing, Feng Shaotong, Nie Shouping, *et al.*. Complex valued

- encrypted image hiding technology based on discrete cosine transform [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 177-181.  
朱竹青, 冯少彤, 聂守平, 等. 基于离散余弦变换的复值加密图像隐藏技术 [J]. 中国激光, 2009, 36(1): 177-181.
- Yang Tao. Research on the Quality of Reconstructed Image and Applications of Digital Holography [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.  
杨 涛. 数字全息再现像质量及应用的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- Ma Lihong, Wang Hui, Li Yong, *et al.*. Improvement for the reconstructed image of digital hologram [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(11): 1993-1997.  
马利红, 王 辉, 李 勇, 等. 数字全息图再现像的像质改善 [J]. 光子学报, 2007, 36(11): 1993-1997.
- Wang Liang, Feng Shaotong, Nie Shouping, *et al.*. Improving the reconstructed image quality of the digital holography through multi-scale transform [J]. J Optoelectronics · Laser, 2007, 18(5): 625-628.  
王 亮, 冯少彤, 聂守平, 等. 利用多尺度变换提高数字全息再现像质量 [J]. 光电子·激光, 2007, 18(5): 625-628.
- Wu Yiquan, Wang Houshu. Enhancement methods of image contrast [J]. J Data Acquisition & Processing, 1989, 4(4): 39-49.  
吴一全, 王厚枢. 图像对比度增强处理方法(一) [J]. 数据采集与处理, 1989, 4(4): 39-49.
- Chen Qian, Bai Lianfa, Zhang Baomin. Histogram double equalization in infrared image [J]. J Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(6): 428-430.  
陈 钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 428-430.
- Zheng Dezhong, Cui Fayi. Contour extraction of image using adaptive bilinear generalized fuzzy enhancement [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 496-504.  
郑德忠, 崔法毅. 自适应双线性广义模糊增强的图像轮廓提取 [J]. 中国激光, 2010, 37(2): 496-504.
- H Demirel, G Anbarjafari. Image resolution enhancement by using discrete and stationary wavelet decomposition [J]. IEEE Trans Image Processing, 2011, 20(5): 1458-1460.
- Zhan Bichao, Wu Yiquan, Ji Shouxin. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 30(10): 2788-2794.  
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2788-2794.
- H Demirel, G Anbarjafari. Discrete wavelet transform-based satellite image resolution enhancement [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6): 1997-2004.
- J K Starck, F Murtagh, E J Candes, *et al.*. Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(6): 706-717.
- Shi Dan, Li Qingwu, Ni Xue, *et al.*. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 342-346.  
石 丹, 李庆武, 倪 雪, 等. 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法 [J]. 光学学报, 2009, 29(2): 342-346.
- Liang Dong, Yin Bing, Yu Mei, *et al.*. Image enhancement based on the nonsubsampled contourlet transform and adaptive threshold [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 527-530.  
梁 栋, 殷 兵, 于 梅, 等. 基于非抽样 Contourlet 变换的自适应阈值图像增强算法 [J]. 电子学报, 2008, 36(3): 527-530.
- Wang Ronggui, Zhang Xuan, Zhang Xinlong, *et al.*. A novel retinex algorithm for image enhancement [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 38(12): 2933-2936.  
汪荣贵, 张 璇, 张新龙, 等. 一种新型自适应 Retinex 图像增强方法研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2933-2936.
- X Zhang, Y Wu, S Wu, *et al.*. Infrared image enhancement based on contourlet transform and chaotic particle swarm optimization [J].

American J Engineering and Technology Research, 2011, 11(12): 2526-2530.

22 Wu Xiaojun, Yang Zhazhong, Zhao Ming. A uniform searching particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica,

2011, 39(6): 1261-1266.

吴晓军, 杨战中, 赵 明. 均匀搜索粒子群算法[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1261-1266.

栏目编辑: 何卓铭

## 光纤激光抽运 34.2 W 连续波中红外光学参量振荡器

3~5  $\mu\text{m}$  波段的中红外光学参量振荡器(OPO)能够实现高效率、可调谐的中红外激光输出,且具有体积紧凑、全电工作等优势,被广泛应用于光电对抗、激光雷达、光谱分析、气体检测、激光手术等领域,受到国内外的广泛关注。连续波激光器内功率密度远低于脉冲激光器,一方面有利于避免光学器件损伤,另一方面可以采用高功率单频光纤激光器作为抽运源,光束质量好,转换效率高,体积也更加紧凑。2011年,国防科学技术大学实现了150 W连续波单频全光纤激光器,并采用该光源进行了连续波中红外OPO研究,实现了12 W的3.4  $\mu\text{m}$ 中红外激光输出。2012年,该项目组将单频光纤激光器功率水平提高至300 W,还开展了千瓦级准单频窄线宽光纤激光器以及光纤激光器的偏振补偿与控制技术研究,在此基础上实现了光纤激光抽运连续波中红外光参量振荡器,中心波长为3.35  $\mu\text{m}$ 时,平均功率最高可达34.2 W。系统结构如图1(a)所示,由光纤激光抽运源、光传递系统、光学参量振荡器和测量系统4部分组成。抽运激光经隔离器后通过光传输系统整形并进行偏振控制,产生约191 W的模式匹配线偏光对MgO:PPLN晶体进行抽运,

光学参量振荡器输出激光包括未吸收抽运光、信号光和中红外闲频光,经两片近红外高反(反射率 $R > 99\%$ ),中红外高透( $R < 3\%$ )的 $45^\circ$ 滤波片后,近红外波段的抽运光和信号光被反射入功率计1(Coherent, PM300F),透射中红外激光由功率计2(Thorlabs, S314C)测量,在中心波长为3.36  $\mu\text{m}$ 时输出功率为33 W,实物图如图1(b)所示。由于激光功率较高,测量光谱时须采用一片中红外增透镜片将反射光衰减至10 mW以下并入射光谱仪(Princeton, SP2300)对中红外激光进行测量,通过改变晶体周期和温度,可以实现3.2~3.9  $\mu\text{m}$ 波段内的调谐输出。经多次测量,激光器在中心波长为3.35  $\mu\text{m}$ 时平均功率最高可达34.2 W,且可以连续30 s以上安全、稳定出光,光-光转换效率约为18%,继续改进OPO腔型和抽运模式有望获得进一步的效率提升。

**致谢:** 特别感谢湖南大学文建国教授课题组提供的设备支持及现场测试指导。特别感谢清华大学巩马理教授、闫平教授、上海光机所周军研究员、华北光电所姜东升研究员的现场测试及工作指导。

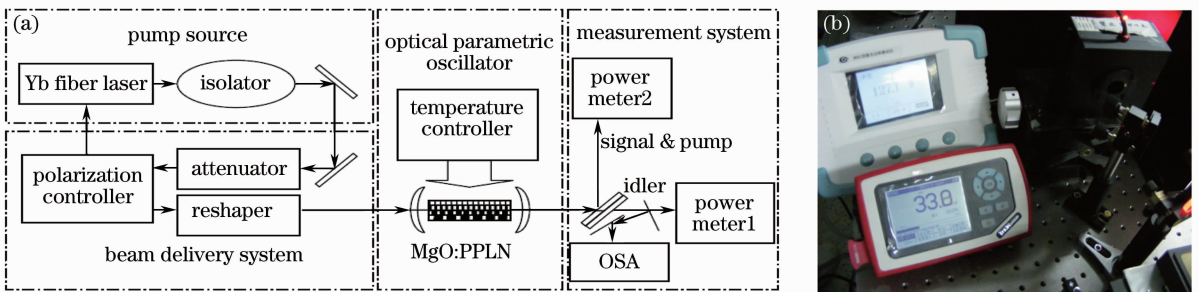


图1 光纤激光抽运连续波中红外光参量振荡器(a)示意图及(b)测量实物图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of fiber laser pumped continue-wave mid-infrared optical parametric oscillator and (b) measurement result

许晓军\* 李 霄 尚亚萍 刘 磊 王红岩  
(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

\* E-mail: xuxj@21cn.com; lxarr2012@gmail.com

收稿日期: 2013-05-29; 收到修改稿日期: 2013-06-14