

## 二阶广义全变分耦合非局部变换域模型的图像放大\*

海 涛<sup>1,2,3</sup>, 鲍宜帆<sup>4,5</sup>, 潘浩浩<sup>1</sup>

(1.南阳师范学院 机电工程学院, 河南 南阳 473061;

2.河南省毫米波无线通信射频前端及天线工程研究中心, 河南 南阳 473061;

3.河南省汽车零部件智能制造工程研究中心, 河南 南阳 473061;

4.南京理工大学 光电学院, 江苏 南京 210094; 5.南阳农业职业学院, 河南 南阳 473061)

**摘要:** 为了提高偏微分方程放大算法对弱边缘和纹理细节的放大效果, 采用二阶广义全变分耦合非局部变换域模型, 提出了一种图像放大算法模型。非局部变换域模型通过对相似图像块构成的图像组进行三维变换, 利用由于图像非局部自相似特性导致的变换系数稀疏特性建模, 能够很好利用图像中相似图像块的非局部信息。该算法利用二阶广义全变分模型增强强边缘, 非局部变换域模型增强弱边缘和纹理细节, 通过变分模型实现两者的耦合, 具有良好的放大效果。与其他算法进行仿真实验比较, 二阶广义全变分耦合非局部变换域模型在处理强边缘、弱边缘和细节上都取得了较好的放大效果。

**关键词:** 广义全变分; 非局部变换域模型; 非局部自相似; 图像放大

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200771

中文引用格式: 海涛, 鲍宜帆, 潘浩浩. 二阶广义全变分耦合非局部变换域模型的图像放大[J]. 电子技术应用, 2021, 47(11): 90-94, 104.

英文引用格式: Hai Tao, Bao Yifan, Pan Haohao. Image enlargement basing on second order total generalized variation coupling to non-local transform domain model[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(11): 90-94, 104.

## Image enlargement basing on second order total generalized variation coupling to non-local transform domain model

Hai Tao<sup>1,2,3</sup>, Bao Yifan<sup>4,5</sup>, Pan Haohao<sup>1</sup>

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;

2. Henan Engineering Research Center for Radio Frequency Front End and Antenna of Millimeter Wave Wireless Communication System, Nanyang 473061, China;

3. Henan Intelligent Manufacturing Engineering Research Center for Vehicle Parts, Nanyang 473061, China;

4. Electro Optic Institute, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China;

5. Nanyang Vocational College of Agriculture, Nanyang 473061, China)

**Abstract:** In order to improve the zoomed effect of the weak edge and texture of image, the image enlargement model is proposed based on partial differential equation, combining total generalized variation and non-local transform domain model. Using the non-local self-similarity property of the image through the three dimension transform of the group composed of similar image block, the sparse representation model in transform domain utilizes non-local information of the image effectively. Total Generalized Variation enhancing strong edges better and non-local transform domain model enhancing the weak edge and texture details better, the proposed model has better performance. Compared with other algorithms, the second-order generalized total variation coupling to non-local transform domain model achieves better amplification effect in dealing with strong edges, weak edges and details.

**Key words:** total generalized variation; non-local transform domain model; non-local self-similarity; image enlargement

## 0 引言

图像放大实现了单幅图像分辨率增强, 在图像处理中有广泛应用。利用全变分 TV 模型(Total Variation, TV)

对图像进行放大<sup>[1]</sup>, 在图像边缘处理上有较好的处理效果, 在平滑图像存在阶梯效应的不足。Bredies 提出了广义全变分(Total Generalized Variation, TGV), 是对全变分

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61702289, 61701262); 教育部电子信息教指委项目(2020-YB-23); 河南省教育厅教改项目(2019SJGLX379); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(21HASTIT032)

模型扩展的新模型<sup>[2]</sup>,解决了图像在平滑区域的阶梯效应,可以逼近高阶多项式,并且具备下半连续性,凸性和旋转不变性。TGV 在图像放大中得到应用,并取得了较好的效果<sup>[3]</sup>。

TGV 虽然较好地避免了阶梯效应,但是在弱边缘和细节部分处理效果提升并不大<sup>[4]</sup>。文献[5]采用 TGV 和剪切波相结合的方法改善弱边缘和细节的增强;文献[6]提出了加权 TGV 模型用于图像放大,增强其对弱边缘和细节的处理效果,通过非局部广义全变分实现对光流图形进行处理,很好地解决了弱边缘和细节处理效果。本文通过实现 TGV 与非局部变换模型相结合的方法实现对图像弱边缘和细节的分辨率增强。

### 1 非局部变换域模型

文献[7]提出了三维块匹配(Block-Matching and 3D filtering, BM3D)算法, BM3D 是一种非局部思想在变换域实现的一种处理方法,其基本思想基于图像中存在相似的图像块,通过寻找相似的图像块,集成一个三维的数据组,由于图像块之间的相似性,三维的数据在变换域是一个稀疏的分解,利用这种稀疏性进行处理。

设  $U$  为  $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$  图像矩阵,  $u$  为图像矩阵进行字典排序后得到的  $R^N$  向量,  $P_j$  为对相似图像块聚集为三维图像块群组,  $W$  为根据图像块群组中与目标图像块的相似度作为加权求平均,  $\Phi^{3D}$  为三维正交变换基,  $\Psi^{3D}$  为三维正交反变换基。文献[8]总结给出了三维变换框架下 BM3D 的变分模型,得到变换域的非局部模型如式(1)所示:

$$J_2(\omega) = \tau \|\omega\|_p$$

$$\text{subject to } u = \Psi\omega, \omega = \Phi u \quad (1)$$

其中,  $\Phi = \Phi^{3D}P_j$ ,  $\Psi = W\Psi^{3D}$ 。

### 2 基于 TGV 耦合非局部变换域模型的图像放大

TGV 模型改进了全变分模型的阶梯效应,保留了图像一阶线性结构,但并未完全解决偏微分方程恢复纹理及弱边缘存在的不足,非局部变换域利用图像的全局信息,能够较好地恢复自然图像中纹理和弱边缘,本文提出一种广义二阶全变分自适应耦合非局部变换域模型的图像放大算法。

#### 2.1 低分辨率图像获取模型

文献[9]给出图像的离散的退化模型如式(2)所示:

$$((h(i, j) * u(i, j)) \downarrow M = v(i', j')) \quad (2)$$

其中,  $h(i, j)$  是图像获取硬件的点扩散函数,为低通滤波器;  $*$  为卷积运算;  $\downarrow M$  为下采样矩阵;  $u(i, j)$  为理想的高分辨率图像,而  $v(i', j')$  为当前的低分辨率图像。各项以字典排序方法转换为矩阵表示法:  $u(i, j)$  用  $u$  表示,  $v(i', j')$  用  $v$  表示,  $H$  表示包涵下采样操作的  $h(i, j)$ , 可得到模型的矩阵表示:  $v = Hu$ 。

由式(2)可得到基于图像获取模型的约束能量函数:

$$J(u) = \|(h(i, j) * u(i, j)) \downarrow M - v(i', j')\|^2$$

$$= \|Hu - v\|^2 \quad (3)$$

#### 2.2 TGV 耦合非局部变换域的图像放大模型

TGV 模型在图像边缘有较好的实现并且能够去除平滑图像的阶梯效应,非局部变换域模型能够较好重建细节和弱边缘,综合其优点,得到本文放大模型。偏微分方程的变分模型优点之一是能够很容易实现和其他模型的耦合,具体实现方法是 TGV 作为惩罚项直接加入非局部变换域变分模型式(2),同时增加图像获取的约束能量函数,可以得到本文提出算法的实现模型如式(4):

$$J(u, \omega) = \lambda \text{TGV}^k(u) + \tau_1 \|\omega\|_p + \frac{1}{2} \int_{\Omega} \|Hu - v\|^2 dx$$

$$\text{subject to } u = \Psi\omega, \omega = \Phi u \quad (4)$$

取  $k=2$  得到二阶 TGV 模型,得到式(5):

$$J(u, \omega) = \lambda \text{TGV}^2(u) + \tau_1 \|\omega\|_p + \frac{1}{2} \int_{\Omega} \|Hu - v\|^2 dx$$

$$\text{subject to } u = \Psi\omega, \omega = \Phi u \quad (5)$$

最小化  $J(u, \omega)$  得到放大图像  $u$  为模型式(5)的最优解:  $(u^*, \omega^*) = \min J(u, \omega)$ 。

#### 2.3 TGV 耦合非局部变换域的图像放大模型实现

式(5)中,两个约束项  $u = \Psi\omega$  和  $\omega = \Phi u$  是一对可逆的正交变换对,对两个变量去耦合并除去其常量项可得:

$$J_3(u, \omega^*) = \lambda \text{TGV}_a^2(u) + \frac{1}{2} \int_{\Omega} \|Hu - v\|^2 dx$$

$$+ \frac{1}{2\gamma} \int_{\Omega} \|u - \Psi\omega^*\|^2 dx \quad (6)$$

$$J_4(u^*, \omega) = \tau_1 \|\omega\|_p + \frac{1}{2\xi} \int_{\Omega} \|\omega - \Phi u^*\|^2 dx \quad (7)$$

可以看出式(6)为受约束的二阶 TGV 模型,实现对图像的锐化操作,而式(7)为  $p$  阶非局部变换域模型,本文取  $p=1$  为图像的去噪操作。

本文放大模型实现通过逐次逼近方法求解式(6)和式(7)最优化解即可求得放大模型(5)的鞍点,进而得到高分辨率图像。

##### 2.3.1 受约束的二阶 TGV 模型实现

式(6)中第二项为退化模型式(3)的约束项,考虑采用文献[10]提出的拉普拉斯框架下采用双正交滤波器实现可逆重建,如图1所示。

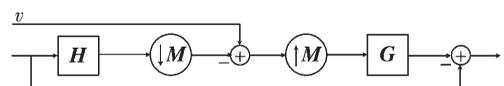


图1 拉普拉斯重建

公式实现如式(8)所示:

$$u(i, j) = u_0(i, j) + (I - GH)d(i, j) \quad (8)$$

其中,  $d(i, j)$  为锐化后图像与初始图像相比图像增加的细节和边缘部分。对正则化处理后的图像求出  $d(i, j)$ , 代入式(8), 求出的新图像完全满足约束模型式(3)。

式(6)的求解可以转化为在式(8)拉普拉斯双正交重建框架下求解式(9)的最优解。

$$u = \arg \min_u J_s(u, \omega^*)$$

$$= \arg \min_u \lambda \text{TGV}_a^k(u) + \frac{1}{2\gamma} \int_{\Omega} \|u - \Psi \omega^*\|^2 dx \quad (9)$$

采用文献[11]一阶原始-对偶算法实现式(9)的最优化求解如下:

(1)根据文献[12],由滤波器  $h(i, j)$  计算出其双正交滤波器  $g(i, j)$ , 初始化:  $u_0 = (v(i', j') \uparrow M) * g(i, j) = Gv$ ,  $\theta \leftarrow 0, \bar{\theta} \leftarrow 0, \bar{u} \leftarrow u_0, p \leftarrow 0, q \leftarrow 0, \delta > 0, \tau > 0$ .

(2)迭代实现式(10):

$$\begin{cases} p^{k+1} = \text{proj}_p(p^k + \delta(\nabla \bar{u} - \bar{\theta}^k)) \\ q^{k+1} = \text{proj}_q(q^k + \delta(\varepsilon(\bar{\theta}^k))) \\ u^{k+1} = \frac{u^k + \tau \text{div}(p^{k+1}) + \tau u_0 / \lambda + \tau \Psi \omega^k / (\lambda \gamma)}{1 + \tau / \lambda} \\ \bar{u}^{k+1} = 2u^{k+1} - u^k \\ \theta^{k+1} = \theta^k + \tau(p^k + \text{div}^h(q^{k+1})) \\ \bar{\theta}^{k+1} = 2\theta^{k+1} - \theta^k \end{cases} \quad (10)$$

(3)拉普拉斯双正交重建:  $k = k + 1, u^{k+1} = u_0 + (I - GH)d = u_0 + (I - GH)(u^{k+1} - u_0)$ .

(4)如果  $u^{k+1} - u^k$  小于较小的常数值,迭代结束;否则,重回步骤(2).

### 2.3.2 一阶非局部变换域模型实现

一阶非局部变换域模型即式(7) $p=1$ 的实现采用文献[13]的变换域硬阈值法求解,即:

$$\omega = \text{sgn}(\omega) \cdot \max(|\omega| - \frac{\tau_1}{2\xi}, 0) \quad (11)$$

迭代实现为:

$$\omega_{k+1} = \text{sgn}(\omega_{k+1}) \cdot \max(|\Phi u_{k+1}| - \frac{\tau_1}{2\xi}, 0) \quad (12)$$

### 2.3.3 本文模型的实现

本文采用逐次逼近方法求解式(6)和式(7)最优化解即可求得放大模型(5)的鞍点,得到高分辨率图像。

具体实现过程如下:

输入:  $v$ (低分辨率图像);  $h$ (设备退化函数)。

初始化: 确定  $h \rightarrow g, \Phi, \Psi, u_0 = (v(i', j') \uparrow M) * g(i, j) = Gv, \omega_0 = \Phi u_0, t = 0, \theta \leftarrow 0, \bar{\theta} \leftarrow 0, \bar{u} \leftarrow u_0, p \leftarrow 0, q \leftarrow 0, \delta > 0, \tau > 0$ 。重复以下操作:

(1)锐化:

①迭代实现式(10);  
②拉普拉斯双正交重建:

$$u^{k+1} = u_0 + (I - GH)d = u_0 + (I - GH)(u^{k+1} - u_0) \quad (13)$$

(2)去噪声:

$$\omega_{k+1} = \text{sgn}(\omega_{k+1}) \cdot \max(|\Phi u_{k+1}| - \frac{\tau_1}{2\xi}, 0) \quad k = k + 1 \quad (14)$$

直到  $u_{k+1} - u_k < \varepsilon$ , 结束迭代;否则,继续从步骤(1)开始。

## 3 仿真实验结果及比较

实验设计如下:给定高分辨率图像(标准图像)如图2所示,利用给出的低通滤波器  $h$  低通滤波后下采样,得



(a)部分 Lena 图像 (b)Pepper 图像 (c)Flower 图像

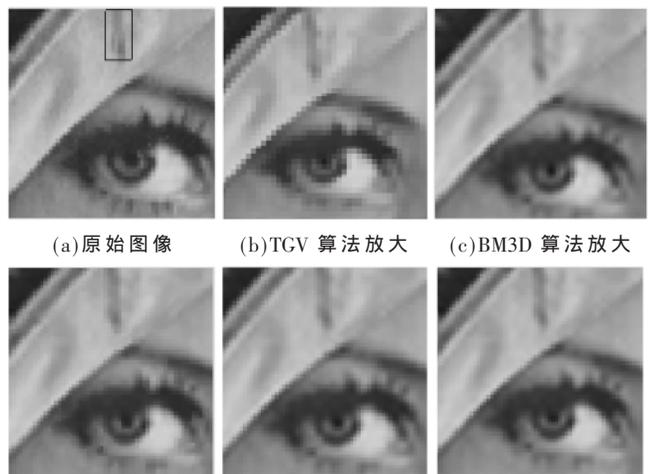
图2 仿真图像

到退化图像如式(3)所示,进行按给定倍数进行分辨率增强。与给定的高分辨率图像进行比较,比较主观视觉效果,相应的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和平均结构相似性测度(Mean Structural Similarity Measure, MSSIM)用户验证算法放大效果<sup>[14]</sup>。

实验参数设置如下,4倍放大时(纵向2倍放大,横向2倍放大),根据文献[2]正则化参数  $\lambda$  约为正则化参数  $\tau_1$  的1/6,本文正则化参数选择为  $\lambda = 0.0017, \tau_1 = 0.0087, \gamma = 0.00055, \xi = 1$ ;TGV正则化求解参数选择为  $\delta = \tau = 1/3, \alpha_1 = 1, \alpha_0 = 4$ 。 $h(i, j)$ 滤波器由一维滤波器  $h(i) = (0.5, 1, 0.5)$ 张量积扩展得到,对应的  $g(i, j)$ 由一维滤波器  $g(i) = (-1/8, 2/8, 6/8, 2/8, -1/8)$ 通过张量积扩展得到。16倍放大由两个4倍放大串联实现。

为验证算法的有效性,选择以下算法进行比较:文献[3]的基于小波变换的TGV图像放大算法、文献[15]的基于BM3D进行放大的算法(简称为BM3D算法)、文献[16]的TV耦合非局部均值滤波器(简称TV-NLF)算法、文献[17]的改进的复扩散耦合非局部均值滤波器(简称ICF-NLF)算法,后两种算法都运用局部的偏微分方程耦合非均值滤波器实现放大,所有比较算法均采用文献中最佳参数。

图3为Lena图像白色方框4倍放大实现,在原始图像图3(a)中的黑框位,TV-NLF算法(即图3(d))存在一定的阶梯效应,其他图像效果要好一些;TGV图像虽然在图像中帽檐的强边缘有较好的锯齿波,但是存在一定



(a)原始图像 (b)TGV 算法放大 (c)BM3D 算法放大 (d)TV-NLF 算法放大 (e)ICF-NLF 算法放大 (f)本文算法

图3 4倍放大部分 Lena 图像

弯曲。图 3(c)BM3D 算法边缘存在模糊现象,本文算法在边缘有较好效果,主要原因是 TGV 耦合了非局部变换域模型较好地去除了边缘的震荡引起的扭曲,在睫毛毛处也有较好的细节小边缘处理效果。

图 4~图 6 为仿真图像 16 倍放大图像。由图 5 的帽檐纹理和头发可以看出,本文算法较好地保留了小边缘和纹理细节,相对于 TGV 算法,帽子上部的纹理和小边缘效果更好,达到其他采用非局部方法处理的效果;BM3D 算法中的强边缘效果较差,存在较大锯齿波,其他采用二阶微分方程的算法不存在这一问题。由图 5 的 Pepper 的柄可以看出,本文算法锯齿波效应较小,其他算法存在不同程度的锯齿波。图 6 同样显示了本文算法弱小边缘的纹理效果最好,可由图 7 的部分放大图像得到进一步验证。

由图 7 图像可以看出,本文算法在页面的纹理细节方面达到了 TV-NLF 算法放大、CF-NLF 算法放大和 BM3D 算法良好水平,同时优于 TGV 算法,本文算法在花蕊柄的边缘效果更好。放大实验结果 PSNR 和 MSSIM

如表 1 所示,本文算法在 PSNR 和 MSSIM 都有最好的仿真结果。

#### 4 结论

本文提出了一种基于 TGV 耦合非局部变换域模型的图像放大算法,该算法能够较好地利用 TGV 模型和非局部变换域模型的优点,得到了较好的放大效果。仿真实验证明,本文算法改进了 TGV 算法小边缘和细节处理能力不足的缺点,同时避免了非局部变换域在强边缘部分的放大处理锯齿波明显的不足,具有较好的视觉效果。与其他放大算法进行比较,PSNR 和 MSSIM 也取得了较好数值,进一步证明本文提出算法具有较好的性能。进一步优化算法中的各个参数,以便实现全局信息和局部信息的最佳耦合是该算法下一步努力的方向。

#### 参考文献

- [1] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60(1): 259-268.
- [2] BREDIES K, KUNISCH K, POCK T T. Total generalized



图 4 16 倍放大 Lena 图像

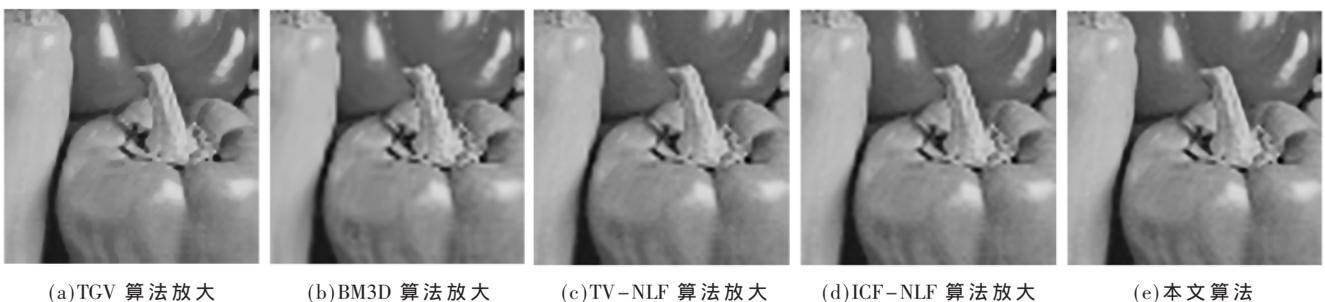


图 5 16 倍放大 Pepper 图像

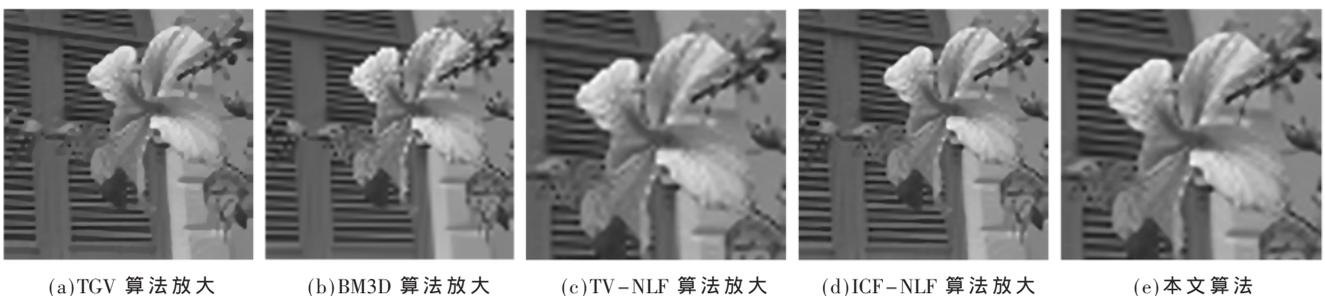


图 6 16 倍放大 Flower 图像

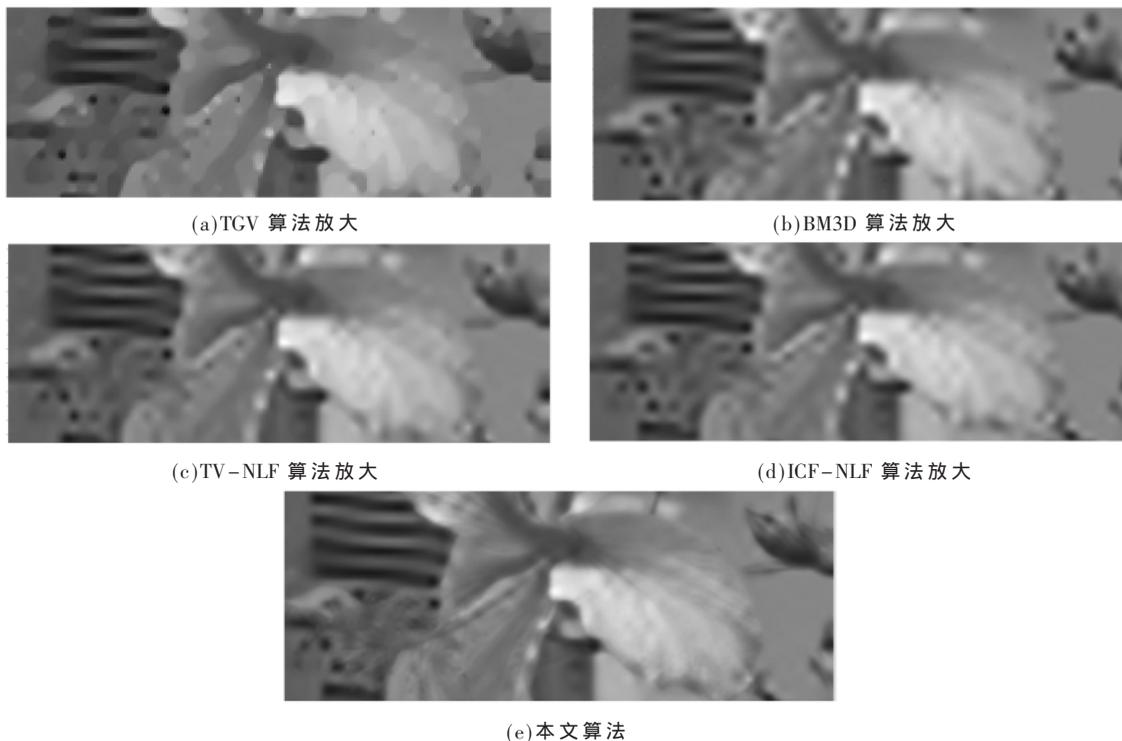


图7 16倍放大部分 Flower 图像

表1 仿真图像 PSNR 和 MSSIM

对比算法 图像		TGV 算法	BM3D 算法	TV-NLF 算法	ICF-NLF 算法	本文算法
部分 Lena (4倍放大)	PSNR/dB	36.331 0	36.612 0	36.846 7	37.260 3	37.364 5
	MSSIM	0.913 5	0.913 4	0.917 5	0.922 8	0.923 8
部分 Lena (16倍放大)	PSNR/dB	33.138 9	32.702 1	33.073 1	33.230 1	33.274 6
	MSSIM	0.764 3	0.744 9	0.765 9	0.769 8	0.771 0
部分 Peppers (16倍放大)	PSNR/dB	35.573 0	34.925 6	35.376 9	35.521 7	35.578 9
	MSSIM	0.817 3	0.798 1	0.812 2	0.813 4	0.817 6
部分 Flower (16倍放大)	PSNR/dB	32.018 5	32.042 1	32.230 2	32.445 0	32.452 7
	MSSIM	0.736 6	0.722 1	0.746 4	0.751 5	0.758 8

variation[J].Siam Journal on Imaging Sciences, 2010, 3(3): 492-526.

[3] BREDIES K, HOLLER M.A TGV regularized wavelet based zooming model[C]//Scale Space and Variational Methods in Computer Vision.Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[4] KNOLL F, BREDIES K, POCK T, et al.Second order total generalized variation(TGV) for MRI[J].Magnetic Resonance in Medicine, 2011, 65(2): 480-491.

[5] GUO W, QIN J, YIN W.A new detail-preserving regularity scheme[J].SIAM Journal on Imaging Sciences, 2014, 7(2): 1309-1334.

[6] 武婷婷, 刘慧, 王友国.基于加权 TGV 模型的原始对偶图像放大算法[J].南京邮电大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 34-38.

[7] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al.Image restoration by sparse 3D transform-domain collaborative filtering[C]//

Image Processing: Algorithms and Systems VI.International Society for Optics and Photonics, 2008.

[8] DANIELYAN A, KATKOVNIK V, EGIAZARIAN K. BM3D frames and variational image deblurring[J].IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1715-1728.

[9] ALY H A, DUBOIS E.Image up-sampling using total-variation regularization with a new observation model [J].IEEE Transactions on Image processing, 2005, 14(10): 1647-1659.

[10] 席志红, 海涛.基于非线性复扩散耦合冲激滤波器的图像放大算法研究[J].通信学报, 2014, 35(2): 1-8.

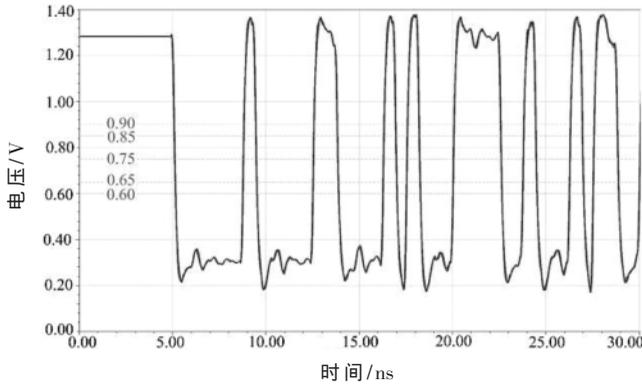
[11] CHAMBOLLE A, POCK T.A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging[J].Journal Mathematical Imaging Vision, 2011, 40(1): 120-145.

[12] DO M N, VETTERLI M.Framing pyramids[J].Transactions on Signal Processing, 2003, 51(9): 2329-2342.

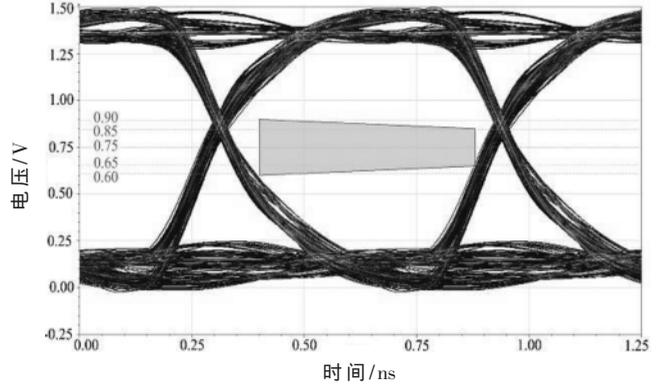
[13] ELAD M, FIGUEIREDO M A T, MA Y.On the role of sparse and redundant representations in image processing[J].Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6): 972-982.

[14] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R.Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J].IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

(下转第 104 页)



(a) 优化后信号波形



(b) 优化后信号眼图

图 11 优化后反面组件数据信号波形与眼图

过孔高度、过孔数量与信号上升时间对串扰噪声的影响以及串扰噪声对信号完整性的影响,在此基础上提出了过孔设计的基本原则与过孔串扰优化的方法;结合实际项目案例,通过增加回流地过孔的方法改善了过孔之间的串扰,得到了符合要求的信号波形与眼图仿真结果,对高速大容量信号过孔设计与串扰噪声优化设计有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] JOHNSON H.高速数字设计[M].沈立,朱来文,陈宏伟,等译.北京:电子工业出版社,2004:203-206.  
 [2] 周润景,苏良碧.Cadence 高速电路板设计与仿真(第四版)[M].北京:电子工业出版社,2011:377-386.  
 [3] 侯斌,杨祎,巩稼民,等.高速大容量存储电路板的信号性能分析研究[J].现代电子技术,2015,38(13):137-140.  
 [4] RIKO R.More-than-Moore 2.5D and 3D SiP Integration[M].West Berlin:Springer Publishing Company,2017.  
 [5] LI Y,GOYAL D.3D microelectronic packaging (from fundamentals to applications)[M].West Berlin:Springer Publishing Company,2017.  
 [6] BOGATIN E.信号完整性与电源完整性分析[M].李玉山,刘洋,初秀琴,等译.北京:电子工业出版社,2019:254-260.  
 [7] 孟辰.高速电路中反射、串扰及 SSN 的分析与研究[D].西安:西安电子科技大学,2013.  
 [8] QIAN L B,ZHU Z M,XIA Y S,et al.Through-silicon-via crosstalk model and optimization design for three-dimensional integrated circuits[J].Chinese Physics,2014,23(3):

0903002.  
 [9] 刘焯铭,曹跃胜.高速多层板过孔分析与仿真[J].计算机工程与设计,2008,29(3):713-715.  
 [10] 董辉,马祖杰.基于 Cadence 的 DDR2 串扰研究与仿真[J].浙江工业大学学报,2016,44(3):266-269.  
 [11] 高振斌,郝晓雪,王蒙军,等.高速 BGA 封装与 PCB 差分互连结构的设计与优化[J].现代电子技术,2017,40(22):137-141.  
 [12] 白金.基于高速数字信号电路的完整性设计[D].西安:西安电子科技大学,2014.  
 [13] 曾燕萍,张景辉,王梦雅,等.DDR3 堆叠键合组件的信号完整性分析与优化[J].电子与封装,2020,20(12):120201.  
 [14] 刘明阳,李勇量.三维电磁仿真在 25Gbps 串行收发通道设计中的应用方法[J].电子技术应用,2018,44(8):23-27.  
 [15] JEDEC.DDR3 SDRAM specification:JESD 79-3F[S].Arlington:JEDEC,Jul 2012.

(收稿日期:2021-02-01)

作者简介:

张景辉(1994-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:信号完整性与电源完整性仿真。

曾燕萍(1987-),女,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:三维集成系统级设计和仿真技术。

王梦雅(1992-),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向:信号完整性与电源完整性仿真。



扫码下载电子文档

(上接第 94 页)

[15] DANIELYAN A,FOI A,KATKOVNIK V,et al.Image upsampling via spatially adaptive block-matching filtering[C]//2008 16th European Signal Processing Conference,Lausanne,2008:1-5.  
 [16] ZHAN Y,LI S J,LI M.Local and nonlocal regularization to image interpolation[J].Mathematical Problems in Engineering,2014(1):1-8.

[17] 海涛,席志红.基于改进复扩散耦合非局部均值滤波器的图像放大[J].系统工程与电子技术,2016,38(5):1182-1188.

(收稿日期:2020-07-21)

作者简介:

海涛(1974-),通信作者,男,博士,讲师,主要研究方向:图像分辨增强、非线性信号处理,E-mail:nytcht@163.com。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所