

# 基于非下采样轮廓波变换遥感影像超分辨率重建方法

周靖鸿 周 璀 朱建军 樊东昊

中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083

**摘要** 针对现有非下采样轮廓波变换(NSCT)超分辨率重建方法的不足提出了一种改进的重建方法。空间频率大小反映图像细节信息丰富的程度,改进方法将区域窗口内空间频率的大小作为定权的标准对NSCT分解获得的各对应高频图像进行自适应加权融合。将NSCT分析与自适应加权融合相结合用以实现影像超分辨率重建,其中利用自适应加权融合方法将各高频图像分别进行融合,同时将低频图像进行取均值处理,分别获得处理后的高低频图像,通过NSCT逆变换获得最终的超分辨图像。通过仿真实验与工程应用验证了改进方法的可行性与有效性。

**关键词** 图像处理;超分辨率重建;非下采样轮廓波变换;区域自适应融合;二维小波变换;双三次插值

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0110001

## A Method of Super-Resolution Reconstruction for Remote Sensing Image Based on Non-Subsampled Contourlet Transform

Zhou Jinghong Zhou Cui Zhu Jianjun Fan Donghao

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

**Abstract** An improved method is proposed to solve the existing problem that the fusion process is too simple in non-subsampled contourlet transform (NSCT) super-resolution reconstruction. The magnitude of the spatial frequency reflects the degree of image detail richness, and the improved method uses this magnitude of regional window as the standard of the weight, so the adaptive weighted fusion method is applied to the obtained high frequency by NSCT decomposition of image. The adaptive weighted fusion method and NSCT analysis are assembled to achieve image super-resolution reconstruction, in this process, each corresponding high-frequency image is fused by adaptive weighted fusion method, and the low-frequency image is processed to get a mean. The super-resolution image is acquired by inverse NSCT to both the low frequency images and high frequency images. Through simulation and engineering practice, the improved method proves to be feasible and effective.

**Key words** image processing; super-resolution reconstruction; non-subsampled contourlet transform; regional adaptive fusion; two-dimensional wavelet transform; bicubic interpolation

**OCIS codes** 100.6640; 120.0280; 100.2000; 110.4155; 010.0280

## 1 引 言

航空航天遥感的快速发展,对遥感图像分辨率的要求会越来越高<sup>[1]</sup>。由于硬件的限制,成像过程中图像传感器像元尺寸不可能无限地缩小,例如法国SPOT-5卫星的电荷耦合器件(CCD)像元尺寸最高已经达到了12.5  $\mu\text{m}$ ,其全色波段的地面分辨率为5  $\text{m}$ <sup>[2]</sup>。对具有交互信息的序列图像通过一定算法提高其分辨率是目前超分辨率重建过程的主要思想<sup>[3]</sup>。二维小波已经广泛应用于图像处理过程<sup>[4-5]</sup>,为遥感图像多分辨率分析

收稿日期: 2014-04-24; 网络出版日期: 2014-04-28

基金项目: 国家973计划(2013CB733303)、国家863计划(2012AA121301)、国家自然科学基金(41274010)

作者简介: 周靖鸿(1989—),男,硕士研究生,主要从事测量数据处理方面的研究。E-mail: chxsjzjh@163.com

导师简介: 朱建军(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事测量数据处理方面的研究。

E-mail: zjj@csu.edu.cn(通信联系人)

提供了有用的工具<sup>[6]</sup>。但究其原理会发现二维小波是一维小波在二维行列方向上的张成,滤波器不具有各向异性与平移不变性<sup>[7]</sup>,且多分辨率分解的方向数有限。在此基础上,2002年,Do等<sup>[8]</sup>提出了轮廓波变换(CT),其将尺度滤波器<sup>[9]</sup>与方向滤波器<sup>[10]</sup>相结合是真正意义上的多方向、多尺度变换,相对于二维小波变换还具有各向异性的优势<sup>[11]</sup>。接着,Da等<sup>[12]</sup>在轮廓波变换的基础上提出了非下采样轮廓波变换(NSCT)。NSCT改进了尺度滤波器与方向滤波器采样的采样模式<sup>[13-14]</sup>从而避免了对观测数据的下采样,使得经NSCT后的图像尺寸没有发生变化而且变换后的数据具有平移不变等特性,与轮廓波变换相比效果更好<sup>[15]</sup>。

NSCT多分辨率分析可用于图像频率域超分辨率重建<sup>[16]</sup>。文献[17]中对序列影像NSCT分解的低频信息求均值,高频信息取极大值,这有一定的重建效果但使得各影像的高频信息未得到充分利用,重建图像缺少部分原图的高频信息。文献[18]中对轮廓波分解的高频部分利用空间频率自适应定权的方式进行加权融合,使得各个高频信息被充分利用,但轮廓波变换不及NSCT优越。在此基础上提出了一种改进的方法,对序列图像NSCT分解后的各高频信息采用区域自适应加权融合代替原有的取极值处理,低频进行取均值处理,这样组合能将各方向上的对应高频信息有效利用,达到信息充分融合的目的。通过实验验证了改进方法较常见频率域超分辨率重建方法优越,可广泛应用于工程实践中。

## 2 NSCT与自适应融合

### 2.1 NSCT多分辨率分析

NSCT是对轮廓波变换的一种改进,又称非下采样轮廓波变换。NSCT分解过程是通过一个非降采样塔式滤波器<sup>[13]</sup>与一个非降采样方向滤波器<sup>[14]</sup>进行的,过程中由于未进行下采样过程,分解后图像的尺寸不会发生变化而且同时保留了轮廓波变换的多方向、多尺度等优点。该过程如图1所示<sup>[12]</sup>,图1(b)中 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 分别为频率域的横纵坐标。

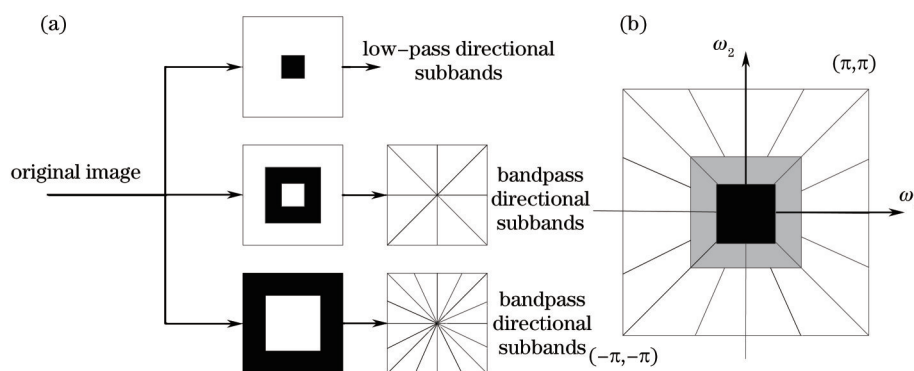


图1 非下采样轮廓波变换。(a) NSCT非下采样滤波器组;(b) NSCT频域划分

Fig.1 Non-subsample contourlet transform. (a) Filter bank of NSCT; (b) frequency partitioning of NSCT

通过NSCT尺度滤波器与方向滤波器将图像进行 $N$ 级分解后可得到1个方向的低频子图与 $2^N$ 个方向的高频子图。最大方向数根据分解的级数来确定,当进行 $N$ 级分解时对应 $2^N$ 个最大方向。分解过程体现了NSCT多分辨率、多方向分解等特性,是图像多分辨率分析的有用工具。其分解过程如下:

$$(L_1, H_1, H_2, \dots, H_{2^N}) = f_{\text{NSCT}^N}(I), \quad (1)$$

式中 $L_1$ 为低频分量, $H_1, H_2, \dots, H_{2^N}$ 分别为 $2^N$ 个方向上的高频分量, $f_{\text{NSCT}^N}$ 表示 $N$ 级NSCT分解, $I$ 为原图。

### 2.2 区域自适应融合

区域特征自适应融合是一种能将同一地区序列观测图像进行融合的方法<sup>[19]</sup>。融合规则是基于图像空间频率的加权平均。空间频率反映区域范围内信息量的大小,求取公式为

$$F_{\text{sum}}(x, y) = \sqrt{[F_m(x, y)]^2 + [F_n(x, y)]^2}, \quad (2)$$

式中 $F_m$ 与 $F_n$ 分别是对应区域的行频率与列频率,

$$F_m(x, y) = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} [f(x+i, y+j) - f(x+i, y+j-1)]^2}, \quad (3)$$

$$F_n(x,y) = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [f(x+i,y+j) - f(x+i-1,y+j)]^2}, \quad (4)$$

式中  $m \text{ pixel} \times n \text{ pixel}$  表示窗口大小,  $f(x,y)$  为  $(x,y)$  处的强度信息, 可以是频率强度。

区域融合是以窗口范围内的空间频率来定权, 空间频率越高则对应的权重越大, 反之则越小。其中窗口大小常选取  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ ,

$$F(x,y) = \frac{aF_{\text{sum}A} \times H_A(x,y) + bF_{\text{sum}B} \times H_B(x,y)}{aF_{\text{sum}A} + bF_{\text{sum}B}}, \quad (5)$$

式中  $H_A, H_B$  为图  $A, B$  在  $(x,y)$  处的像素值,  $F_{\text{sum}A}, F_{\text{sum}B}$  为各自空间频率,  $a, b$  为权。当  $F_{\text{sum}A} > F_{\text{sum}B}$  时,  $a=1, b=F_{\text{sum}B}/F_{\text{sum}A}$ , 当  $F_{\text{sum}A} < F_{\text{sum}B}$  时,  $b=1, a=F_{\text{sum}A}/F_{\text{sum}B}$ ,  $F(x,y)$  为该点融合结果。

### 3 改进算法

#### 3.1 配准与插值过程

文献[17]对高频信息的融合过于简单, 未将各序列图像的高频信息充分利用。文献[18]中虽运用了空间频率自适应定权的方法对高频信息进行加权融合, 但多分辨率分析用到的是轮廓波变换, 不及 NSCT 变换优越。

序列影像间的信息有相同部分也有差异部分, 图像配准后空间频率大反应图像细节信息量大的部分应定权较大, 反之空间频率小反应细节信息量少的部分应定权较小。空间频率自适应定权方法就是根据这一原理来合理定权, 从而将图像高频细节信息最佳地进行融合。NSCT 分解相比于二维小波得到很大改进, 可对图像进行更多方向更精确的高频信息提取, 相比于轮廓波变换而言, 其改进了滤波器下采样的过程, 克服了频率混叠效应。

基于此提出了一种改进方法, 首先利用矩阵乘法离散傅里叶变换将观测的序列低分辨率图像进行高精度配准。矩阵乘法离散傅里叶变换是由 Soummer 等<sup>[20]</sup>提出的基于矩阵相乘的离散傅里叶变换方法, 该方法可求得两图像之间的亚像素位移。在图像配准过程中该算法进行部分区域点重采样的离散傅里叶变换(DFT), 相对传统配准方法提高了效率<sup>[21]</sup>, 而且其配准精度与传统亚像素配准方法相同<sup>[22]</sup>。二维矩阵乘法傅里叶变换方法是在一维的基础上推导的, 一维 DFT 的表达式为

$$F(u_j) = \sum_{k=0}^{N-1} f(x_k) \exp(-2i\pi jk/N), \quad j = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (6)$$

将(6)式展开成矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} F(u_0) \\ F(u_1) \\ F(u_2) \\ \vdots \\ F(u_{N-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \exp(-i2\pi/N) & \exp(-i4\pi/N) & \cdots & \exp[-i2\pi(N-1)/N] \\ 1 & \exp(-i4\pi/N) & \exp(-i8\pi/N) & \cdots & \exp[-i2\pi 2(N-1)/N] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \exp[-i2\pi(N-1)/N] & \exp[-i2\pi 2(N-1)/N] & \cdots & \exp[-i2\pi(N-1)(N-1)/N] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(x_0) \\ f(x_1) \\ f(x_2) \\ \vdots \\ f(x_{N-1}) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

若  $\mathbf{X}=(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})^T$  为输入序列, 其对应  $\mathbf{U}=(u_0, u_1, \dots, u_{N-1})^T$  为输出序列, (7)式还可以表示为

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}) = \exp(-2i\pi \mathbf{U} \mathbf{X}^T) \mathbf{f}(\mathbf{X}). \quad (8)$$

由一维矩阵乘法 DFT 推导二维矩阵乘法 DFT 如下,

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \exp(-2i\pi \mathbf{U} \mathbf{X}^T) \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \exp(-2i\pi \mathbf{Y} \mathbf{V}^T), \quad (9)$$

式中  $(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  是空域二维序列,  $(\mathbf{U}, \mathbf{V})$  是其对应的频率域输出序列。

利用矩阵乘法傅里叶变换获得图像间亚像素配准位置。超分辨率重建过程涉及到影像图幅的放大, 为使影像的图幅增大, 在重建过程中需要进行插值处理, 双三次插值要优于一般的线性插值<sup>[23]</sup>。因此图像高精度配准后选择双三次插值来进一步处理, 插值过程选取的基函数为

$$S(w) = \begin{cases} 1 - 2|w|^2 + |w|^3, & |w| < 1 \\ 4 - 8|w| + 5|w|^2 - |w|^3, & 1 \leq |w| < 2 \\ 0, & |w| \geq 2 \end{cases}. \quad (10)$$

式中  $w$  表示二维影像纵横坐标  $x, y$  方向上待插的细微位置。

### 3.2 NSCT域融合过程

在插值的基础上进行NSCT分解获得低频图像与多个方向的高频图像。据(1)式对配准并插值后的影像对  $a, b$  进行NSCT分解,

$$\begin{pmatrix} L_a, H_{a_1}, H_{a_2}, \dots, H_{a_n} \\ L_b, H_{b_1}, H_{b_2}, \dots, H_{b_n} \end{pmatrix} = f_{\text{NSCT}^n} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (11)$$

式中  $H_{a_1}, H_{a_2}, \dots, H_{a_n}$  与  $H_{b_1}, H_{b_2}, \dots, H_{b_n}$  分别为  $a, b$  分解得到的各方向高频子图,  $L_a$  与  $L_b$  为各自分解获得的低频子图。

然后对低频分量  $L_a, L_b$  求取均值处理得  $L_{ab}$  :

$$L_{ab} = f_{\text{Ave}} \begin{pmatrix} L_a \\ L_b \end{pmatrix}^T. \quad (12)$$

各高频子图分量运用(2)~(5)式分别进行区域自适应融合,

$$(H_{ab_1}, H_{ab_2}, \dots, H_{ab_n})^T = F \begin{pmatrix} H_{a_1}, H_{a_2}, \dots, H_{a_n} \\ H_{b_1}, H_{b_2}, \dots, H_{b_n} \end{pmatrix}^T, \quad (13)$$

式中  $F$  表示区域自适应融合过程,  $H_{ab_1}, H_{ab_2}, \dots, H_{ab_n}$  分别为各高频子图对应融合结果, 例如  $H_{ab_1}$  为  $H_{a_1}$  与  $H_{b_1}$  的融合结果。

最后对融合后的高低频信息进行NSCT逆变换得到超分辨率图像

$$R_S = i_{\text{NSCT}}(L_{ab}, H_{ab_1}, H_{ab_2}, \dots, H_{ab_n}), \quad (14)$$

式中  $i_{\text{NSCT}}$  表示NSCT逆变换,  $R_S$  表示重建获得的超分辨率结果。

改进方法将上述各个环节相结合是一种在矩阵乘法傅里叶变换高精度配准情况下基于NSCT多分辨率分解并利用图像区域自适应加权融合的超分辨率图像重建方法, 为叙述简单以下简称MINF算法(每个字母代表方法中的配准、插值、NSCT变换、区域融合各步骤)。

MINF算法具体步骤如下:

- 1) 亚像素配准。利用矩阵乘法离散傅里叶变换求取序列图像间的亚像素位移;
- 2) 双三次插值。利用双三次卷积插值对配准后的图像进行插值放大。由于图像间亚像素位移是成像过程中下采样造成的, 为此采用双三次卷积上采样方式将图像分辨率增大是其逆过程可提高分辨率;
- 3) NSCT分解。对插值后的图像进行1级4方向NSCT分解, 得到低频图像与16个方向高频图像;
- 4) 自适应融合。对低频图像取均值, 各对应方向高频图像进行自适应加权融合。高频细节信息充分融合, 使得图像在视觉上也更加清晰, 高低频均得到优化;
- 5) NSCT重构。对融合后的低频以及融合后各个方向的高频图像进行NSCT逆变换获得最终改进方法超分辨率图像重建结果。

## 4 仿真实验

为了验证改进方法的有效性与优越性, 进行仿真实验。对512 pixel×512 pixel大小的Lena灰度图像进行隔行隔列降采样得4幅256 pixel×256 pixel的图像(重建过程需提高4倍分辨率), 将4幅图像进行均值处理得到降质后的实验用图A1, 如图2(a)所示, 对该图进行(0.5,0.5)像素的位移(亚像素位移通过频率域相位位移来实现)得到待配准图像A2, 如图2(b)。用这两幅图像进行超分辨率图像重建后便可利用原图作为参考图像进行算法效果的对比。由于实际应用中遥感图像难免会夹杂着噪声, 为此实验还模拟了图像存在不同程度高斯与脉冲混合噪声时的情况。遥感图像主要受高斯与脉冲混合噪声影响的类型<sup>[24]</sup>为: 0.01/0.0005、0.02/0.001、0.05/0.001、0.1/0.01, 每组数据的前一个值代表高斯噪声的方差, 后一个值代表脉冲噪声的密度。图像2(c)是A1加入了方差为0.01的高斯噪声与密度为0.0005的脉冲噪声时得到的图像B1, 同理图2(d)为A2加入了方差为0.01的高斯噪声与密度为0.0005的脉冲噪声时得到的图像B2。选用峰值性噪比(PSNR,  $P_{\text{SNR}}$ )与均方根误差(RMSE,  $R_{\text{MSE}}$ )作为定量评价指标<sup>[25]</sup>, 峰值性噪比越大、均方根误差越小代表超分辨重建效果越好, 计算公式分



别为

$$P_{SNR} = 10 \lg \frac{(M \times N)}{(f - \hat{f})^2}, \quad (15)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \hat{f}(i,j)]^2}. \quad (16)$$

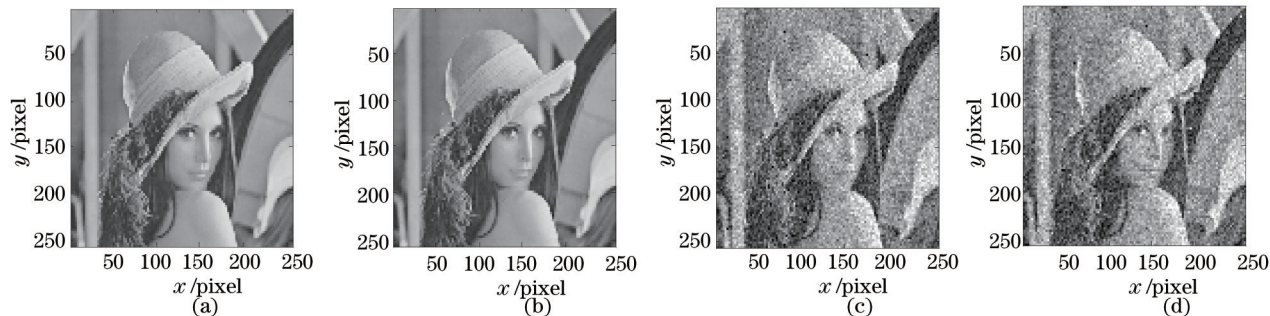


图2 实验用图。(a) A1; (b) A2; (c) B1; (d) B2

Fig.2 Experiment figure. (a) A1; (b) A2; (c) B1; (d) B2

为分析 MINF 算法的重建效果及其稳健性,对不含噪声和含有各类混合噪声的实验用图分别采用全小波插值超分辨率重建、小波双线性插值超分辨率重建、小波双三次插值超分辨率重建、文献[17]中基于 NSCT 频率域双三次插值超分辨率重建、文献[18]中基于轮廓波变换与自适应融合的超分辨率重建以及的 MINF 超分辨率重建进行对比实验。实验中选取常用的正交性较好的‘db8’小波进行小波变换的重建过程;MINF 法的 NSCT 变换选取 1 级 4 方向的分解,并结合‘dmaxflat7’非下采样方向滤波器与‘maxflat’非下采样塔式滤波器;轮廓波变换采用‘pkva8’方向滤波器与‘9-7’塔式滤波器。MINF 算法的超分辨率重建结果如图 3 所示,图 3(a)为图像对(A1,A2)重建的结果,图 3(b)为图像对(B1,B2)重建的结果。各方法在不含噪声时的实验结果如表 1 所示,含 4 类不同混合噪声时的实验结果如表 2 所示。

表 1 各方法不含噪声时的重建结果

Table 1 Reconstruction results of different methods when there is no noise

Evaluation indicator	Wavelet interpolation	Wavelet bi-linear interpolation	Wavelet bi-cubic interpolation	Method in Ref.[17]	Method in Ref.[18]	MINF
PSNR	10.66	10.67	26.13	30.06	30.43	30.66
RMSE	74.67	74.64	12.58	8.01	7.68	7.47

表 2 各方法含混合噪声时的重建结果

Table 2 Reconstruction results of different methods when there is mixed noise

Denoising method	Noise pollution				
	0.01/0.0005	0.02/0.001	0.05/0.001	0.1/0.01	
Wavelet interpolation ( $P_{SNR}/R_{MSE}$ )	10.53/75.90	10.40/76.97	10.06/80.13	9.59/84.56	
Wavelet bi-linear interpolation ( $P_{SNR}/R_{MSE}$ )	10.37/77.31	10.11/79.64	9.46/85.82	8.69/93.75	
Wavelet bi-cubic interpolation ( $P_{SNR}/R_{MSE}$ )	19.69/26.43	17.32/34.73	14.16/49.94	11.89/64.87	
Method in Ref.[17] ( $P_{SNR}/R_{MSE}$ )	23.17/17.71	20.71/23.49	17.47/34.11	15.23/44.18	
Method in Ref.[18] ( $P_{SNR}/R_{MSE}$ )	23.31/17.42	20.80/23.25	17.57/33.72	15.25/44.04	
MINF ( $P_{SNR}/R_{MSE}$ )	23.45/17.13	21.00/22.74	17.74/33.08	15.38/43.39	

由表 1 与表 2 可知,不含噪声以及含有多种类型混合噪声情况下,MINF 法峰值性噪比最大,均方根误差最小,超分辨重建效果最好。通过对结果的分析可以得到以下几点结论:以上所有的方法用于超分辨率实现都有一定的效果,但不同方法效果不同;小波变换用于图像超分辨率重建具有一定的效果,但同轮廓波变换与 NSCT 进行对比,基于小波变换的传统方法存在明显的差距,体现了轮廓波变换与 NSCT 相对于小波变换多方向、多尺度、各项异性的优势;MINF 法是通过区域的空间频率作为权值进行自适应加权融合的方法,

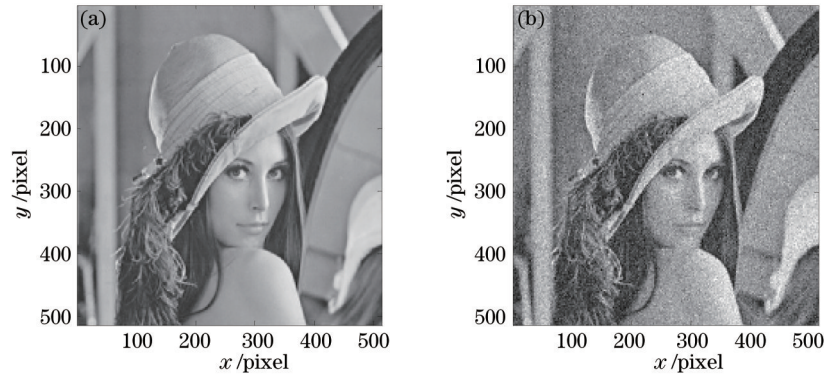


图3 MINF法超分辨率重建结果。(a) A; (b) B

Fig.3 Super-resolution reconstruction result of MINF method. (a) A; (b) B

这相比于文献[17]中NSCT分解后低频求均值,高频取极值的方法相比,高频细节信息融合得更加充分;MINF法与文献[18]中的方法相比,由于采用了NSCT变换,因此与文献[18]中的轮廓波变换相比不会出现频谱混叠现象,且多方向、多分辨率分解得更加精确,所得峰值信噪比与均方根误差效果都较文献[18]中的结果要好,同时证明了NSCT变换要较轮廓波变换更加的优越。

### 5 工程实例

为验证MINF法应用于实际遥感影像超分辨率重建的效果,进行另一组实验。数据截取某地区不同时刻拍摄的卫星遥感影像,经校正并粗配准后,如图4(a)、(b)所示,用矩阵乘法傅里叶变换得两影像间存在的亚像素位移为(0.5,0.5),两影像灰度有明显差别,同时图4(c)为该地区更高分辨率影像参考。

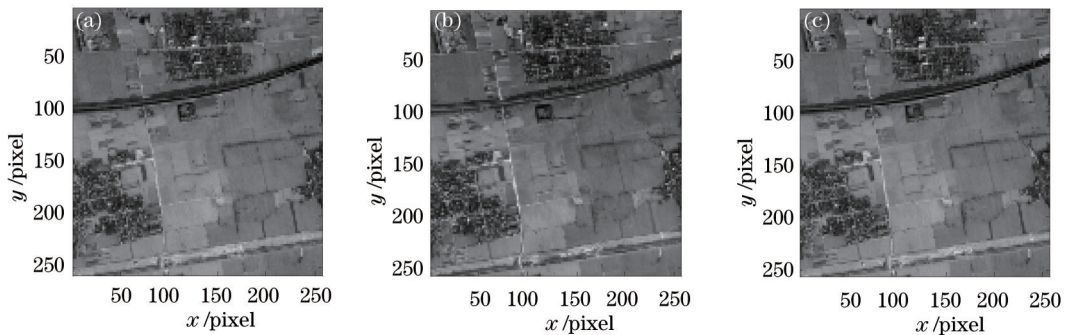


图4 实验用图。(a) C1; (b) C2; (c) C

Fig.4 Experiment figure. (a) C1; (b) C2; (c) C

对实验用图(C1,C2)分别采用全小波插值、小波双线性插值、小波双三次插值、文献[17]中方法、文献[18]中方法、MINF法进行对比实验。为定性观察,图5列出了各方法的重建图像。各方法重建后结果如表3所示。

表3 不同方法遥感图像重建结果对比

Table 3 Comparison result of different reconstruction methods for remote sensing image

Evaluation indicator	Wavelet interpolation	Wavelet bi-linear interpolation	Wavelet bi-cubic interpolation	Method in Ref.[17]	Method in Ref.[18]	MINF
PSNR	14.48	14.45	22.39	26.00	26.24	29.97
RMSE	48.13	48.33	19.36	12.78	12.43	8.09

对真实遥感图像进行实验,从图5的定性分析与表3的定量对比结果都说明MINF算法可以应用于遥感图像超分辨重建。通过对比分析可得到以下几点结论:从图5中各方法的对比可以看出MINF法用于遥感影像超分辨率重建时有助于提高图像的边缘纹理细节使重建的高分辨率图像同时具有序列低分辨率图像的共同特征,相对于序列低分辨率图像而言提高了图像的分辨率使图像更清晰,信息更丰富;从表3中 $P_{SNR}$ 与 $R_{MSE}$ 参数对比可以看出NSCT相比于轮廓波变换与小波变换应用于遥感图像超分辨重建过程具有明显的优

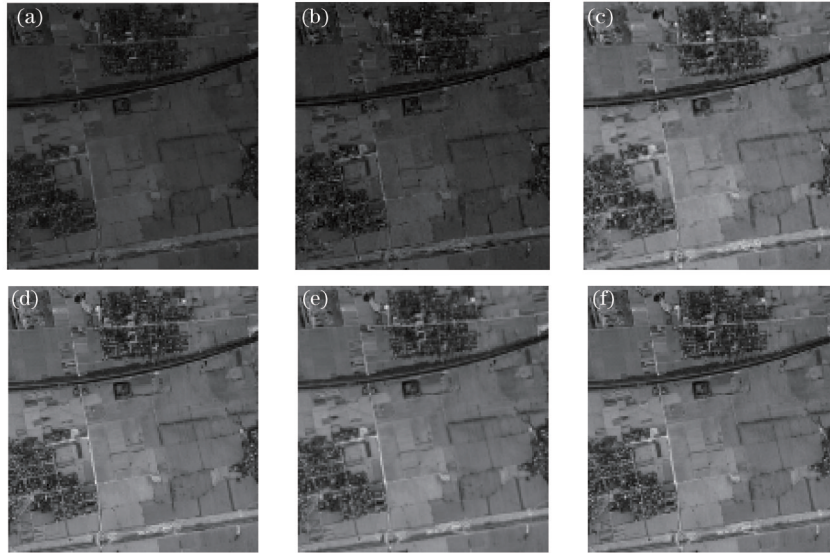


图5 重建结果。(a) 全小波插值;(b) 小波双线性次插值;(c) 小波双三次插值;(d) 文献[17]重建结果;(e) 文献[18]重建结果;(f) MINF法重建结果;

Fig.5 Reconstruction results. (a) Wavelet interpolation;(b) wavelet bilinear interpolation;(c) wavelet bicubic interpolation;(d) reconstruction result based on Ref.[17]; (e) reconstruction result based on Ref.[18]; (f) reconstruction result based on MINF method; MINF法自适应加权融合与文献[17]中的简单融合方法相比具有更好的细节纹理效果,单纯地将NSCT或轮廓波变换与插值法相结合应用于超分辨率重建过程效果不是最优;MINF法与文献[18]中的方法对比说明了NSCT变换相比于轮廓波变换应用于遥感图像的多分辨率分析效果更好。

为进一步研究MINF法中NSCT分解级数和方向数对算法精度的影响,选取上文中的真实遥感数据进行实验。分别将实验数据进行NSCT 1~4级与1~4方向的MINF方法实验(共16种组合方法),实验结果如表4所示,图6为根据表4中数据绘制的结果图。

表4 MINF法在NSCT分解不同级数与不同方向数时的结果

Table 4 MINF results of different layers and different directions based on NSCT decomposition

Number (levels and directions)	1 (1-1)	2 (1-2)	3 (1-3)	4 (1-4)	5 (2-1)	6 (2-2)	7 (2-3)	8 (2-4)
PSNR	29.9427	29.9535	29.961	29.9668	29.3726	29.4786	29.5868	29.6161
RMSE	8.1172	8.1071	8.1001	8.0947	8.6678	8.5627	8.4567	8.4282
Number (levels and directions)	9 (3-1)	10 (3-2)	11 (3-3)	12 (3-4)	13 (4-1)	14 (4-2)	15 (4-3)	16 (4-4)
PSNR	28.5435	28.5583	28.6972	28.7708	22.5019	22.5019	22.5019	22.5019
RMSE	9.5359	9.5198	9.3687	9.2897	19.1182	19.1182	19.1182	19.1182

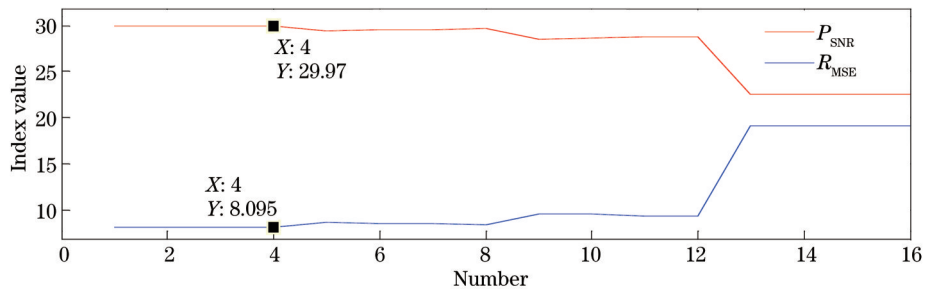


图6 16种情况重建结果对比

Fig.6 Comparison of reconstruction result for 16 kinds of situations

根据表4与图6,总体来看,NSCT分解级数的不断增大使得MINF法的重建效果有下降趋势,但在每一级的分解范围内,方向滤波器分解方向数选取的越多将使得重建效果越好。图6中注明,在分解级数为1级、方向数为4即16个方向时,MINF法重建效果最好。在第3级至第4级的分解过程中,重建效果发生明显



改变,且从第4级开始分解的方向数几乎对重建结果影响不大,这说明随着分解级数的增加,MINF法的重建结果受NSCT方向滤波器的影响较小并趋于稳定。

## 6 结 论

针对现有方法的不足,提出了一种将自适应加权融合方法与NSCT域多分辨率分解相结合的超分辨率重建方法。方法在NSCT域进行自适应加权融合,使图像高频信息融合得更加充分。模拟实验说明了该方法能同时适用于含混合噪声的遥感图像和不含噪声的图像,证明改进方法的稳健性较好。真实遥感图像的实验表明,改进方法从定量分析到定性对比都较传统方法优越,且选取1级4向的NSCT分解效果最优。有以下几点创新:1)将NSCT频率域多分辨率分解与自适应加权融合法相结合可以使得序列低分辨率图像的高频信息得到多方向上的充分融合,确保了融合的准确性,丰富了高频信息;2)先将配对图像进行插值放大,再对其进行下一步的融合过程,可进一步减少由于上采样插值带来的一定量误差,通过自适应加权融合对其进行了一次降噪处理,重建效果较好。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Zhitao, Liu Jingguo, Long Kehui, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728001.  
许志涛,刘金国,龙科慧,等.高分辨率空间相机调焦机构精度分析[J].*光学学报*, 2013, 33(7): 0728001.
- 2 Sun Tao, Lin Liyu, Sun Fuxiong, *et al.*. The Optical Remote Sensing Image Restoration and Super-Resolution Reconstruction[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012.  
孙涛,林立宇,孙夫雄,等.光学遥感影像复原与超分辨重建[M].北京:国防工业出版社,2012.
- 3 Tan Bing, Xu Qing, Xing Shuai, *et al.*. Wavelet super-resolution algorithm and its application to SPOT images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(3): 233-238.  
谭兵,徐青,邢帅,等.小波超分辨率重建算法及其在SPOT影像中的应用[J].*测绘学报*, 2004, 33(3): 233-238.
- 4 Liu Jizhong, Jin Mingliang, Ma Ruyuan, *et al.*. Novel deterministic simple 0-1 observation matrix and wavelet sparsity based compressed sensing implementation method for embedded vision system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40 (11): 1109002.  
刘继忠,金明亮,马如远,等.一种基于小波稀疏确定性简单二值观测矩阵的嵌入式视觉压缩传感实现方法[J].*中国激光*, 2013, 40(11): 1109002.
- 5 Zhou Yang, Li Xiaorun, Zhao Liaoying. Modified linear-prediction based band selection for hyperspectral image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0828002.  
周杨,厉小润,赵辽英.改进的高光谱图像线性预测波段选择算法[J].*光学学报*, 2013, 33(8): 0828002.
- 6 Huang Dengshan, Yang Minhua, Xu Haiwei, *et al.*. Fusion of multi-spectral and panchromatic images using optimal estimation theory [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1039-1042.  
黄登山,杨敏华,胥海威,等.利用最优估计理论进行多光谱与全色影像融合[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(9): 1039-1042.
- 7 R R Coifman, D L Donoho. Translation-Invariant De-Noising [M]. New York: Springer Press, 1995.
- 8 M N Do, M Vetterli. Contourlets: A directional multiresolution image representation [C]. *IEEE*, 2002, 1(1): 357-360.
- 9 P Burt, E Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, 31(4): 532-540.
- 10 R H Bamberg, M J T Smith. A filter bank for the directional decomposition of images: Theory and design [C]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, 40(4): 882-893.
- 11 M N Do, M Vetterli. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.
- 12 A L Da Cunha, J Zhou, M N Do. The nonsubsampling contourlet transform: Theory, design, and applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- 13 M N Do, M Vetterli. Framing pyramids [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(9): 2329-2342.
- 14 Y M Lu, M N Do. Multidimensional directional filter banks and surfacelets [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(4): 918-931.



- 15 Wu Wei, Yang Xiaomin, Chen Mo, *et al.*. Super-resolution restoration algorithms based on improved nonsubsampled Contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1493–1501.  
吴 炜, 杨晓敏, 陈 默, 等. 基于改进的非下采样 Contourlet 变换的超分辨率复原算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(6): 1493–1501.
- 16 Ye Chuanqi, Wang Baoshu, Miao Qiguang. Fusion algorithms of multi-spectral and high-resolution images based on region feature in NSCT domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1240–1247.  
叶传奇, 王宝树, 苗启广. 一种基于区域的 NSCT 域多光谱与高分辨率图像融合算法[J]. *光学学报*, 2009 (5): 1240–1247.
- 17 Yang Zhenping, Niu Haijun, Ding Lei. A new image super-resolution restoration method by NSCT [J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(1): 34–37.  
杨贞萍, 牛海军, 丁 磊. 一种新的 NSCT 超分辨率图像复原技术[J]. *西安电子科技大学学报*, 2012, 39(1): 34–37.
- 18 Liu Kun, Guo Lei, Chang Weiwei. Regional feature self-adaptive image fusion algorithm based on Contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 681–686.  
刘 坤, 郭 雷, 常威威. 基于 Contourlet 变换的区域特征自适应图像融合算法[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 681–686.
- 19 Zhenhua Li, Zhongliang Jing, Shaoyuan Sun. Pixel-clarity-based multifocus image fusion [J]. *Chin Opt Lett*, 2004, 2(2): 82–85.
- 20 R Soummer, L Pueyo, A Sivaramakrishnan, *et al.*. Fast computation of Lyot-style coronagraph propagation [J]. *Opt Express*, 2007, 15 (24): 15935–15951.
- 21 H Foroosh, J B Zerubia, M Berthod. Extension of phase correlation to subpixel registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(3): 188–200.
- 22 M G Sicairos, S T Thurman, J R Fienup. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(2): 156–158.
- 23 Qu Youshan, Tian Weijian, Li Yingcai, *et al.*. Improvement of the space resolution of the optical remote sensing image by the wavelet bi cubic Interpolation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 601–604.  
屈有山, 田维坚, 李英才, 等. 基于小波双三次插值提高光学遥感图像空间分辨率的研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(5): 601–604.
- 24 Wang Xianghai, Zhang Hongwei, Li Fang. A PDE-based hybrid model for de-noising remote sensing image with Gaussian and salt-pepper noise [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(3): 283–288.  
王相海, 张洪为, 李 放. 遥感图像高斯与椒盐噪声的 PDE 混合去噪模型研究[J]. *测绘学报*, 2010, 39(3): 283–288.
- 25 Hu Haihe, Bai Tingzhu, Han Qiang, *et al.*. Infrared illumination model and infrared scene simulation based on blinn-phong model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0611003.  
胡海鹤, 白廷柱, 韩 强, 等. 基于 Blinn-Phong 模型的红外辐照模型及其红外场景仿真[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0611003.

栏目编辑: 张浩佳