

## 基于非亚采样 Contourlet 和 SWT 的多光谱图像和全色图像的融合算法

时海亮<sup>①②</sup> 方 敏<sup>①</sup> 梁锦锦<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

<sup>②</sup>(郑州轻工业学院信息与计算科学系 郑州 450002)

<sup>③</sup>(西安电子科技大学理学院 西安 710071)

**摘 要:** 该文研究了多尺度几何分析工具非亚采样 Contourlet 变换(NSCT), 提出一种新的全色图像和多光谱图像融合的方法。该方法首先对全色图像和进行过 IHS 变换的多光谱图像的亮度分量进行 NSCT 变换, 对于二者的低频近似系数再进行平稳小波变换(SWT)并融合, 进一步提高融合图像的空间信息量, 对于高频细节系数, 采用基于局部平均梯度的方法进行融合, 经过逆 NSCT 得到融合图像。实验结果表明, 该文提出的方法在保留多光谱图像的光谱信息的同时, 增强了融合图像的空间细节表现能力, 提高了信息量, 并且优于传统的基于 IHS 变换、小波变换、双树复小波变换及 Contourlet 变换的融合方法, 该方法是有效可行的。

**关键词:** 图像融合; 全色图像; 多光谱图像; 非亚采样 Contourlet; 平稳小波变换

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0124-05

## Fusion of Multispectral and Panchromatic Satellite Images Based on Nonsubsampled Contourlet Transform and Stationary Wavelet Transform

Shi Hai-liang<sup>①②</sup> Fang Min<sup>①</sup> Liang Jin-jin<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Computer Science & Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(Dept. of Information and Computational Science, Zhengzhou Univ. of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

<sup>③</sup>(School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** This paper researches the multiscale geometry analysis tool, NonSubsampled Contourlet Transform (NSCT), and proposes a new method of fusing panchromatic and multispectral images based on NSCT and Stationary Wavelet Transform (SWT). This method first performs NSCT on panchromatic image and the intensity component of multispectral image with IHS, then fuses the low frequency coefficients with SWT for further spatial information extraction, and fuses the high frequency coefficients based on local average gradient fusion rule, finally a fused image is obtained through inverting NSCT. The experimental results show that the proposed method can effectively preserve spectral information and improve spatial information of the fused image, and outperforms the traditional IHS, wavelet, DT-CWT and contourlet methods.

**Key words:** Image fusion; Panchromatic image; Multispectral image; Nonsubsampled contourlet; SWT

### 1 引言

随着遥感技术的发展, 卫星提供了大量的具有不同的空间分辨率、频谱分辨率和时相分辨率的遥感图像。高空间分辨率全色图像反映了空间结构信息, 能够详尽地表达地物的细节特征; 低空间分辨率多光谱图像的光谱信息丰富, 有利于对地物的识别与解释; 将全色图像和多光谱图像进行融合, 尽量增强多光谱图像的空间分辨率, 可以改善后续处理效果, 在土地利用调查、城区识别和森林资源调查等遥感应用领域中有着极其重要的作用。

传统的全色图像和多光谱图像融合算法包括基于 Brovey 变换, IHS 变换, PCA 变换的图像融合方法<sup>[1]</sup>。此类

方法在有效地提高融合图像空间分辨率的同时却引入了严重的频谱失真<sup>[2]</sup>。近年来, 基于多分辨率分解的融合算法被广泛应用在遥感图像融合中, 有效地克服了频谱失真问题, 典型的为基于小波变换的融合方法。小波变换以其良好的时频分析特性被广泛应用于图像融合, 并成为图像融合领域的重要方法<sup>[3]</sup>, 然而小波变换本身存在着一些缺点: 小波变换不能最优地表示含线或面奇异的高维函数, 其基的支撑区间为正方形, 只能用点来逼近奇异性曲线; 小波变换只能捕获有限的方向信息, 即水平、垂直和对角方向, 方向性的缺失使小波变换不能充分地利用图像本身的几何正则性<sup>[4-7]</sup>; 另外, 小波变换中存在下采样操作, 缺乏平移不变性; 小波变换并不是最优的或者说是最稀疏的函数表示方法。相继, 新的高维函数的最优表示方法被提出, 有脊波变换、单尺度脊波变换、Curvelet 变换、Bandelet 变换、Contourlet 变换<sup>[4,5]</sup>

2007-07-03 收到, 2008-01-14 改回

陕西省自然科学基金(2005F51)和西安市科技创新计划(YF07012)资助课题

和非亚采样 Contourlet 变换(NonSubsampled Contourlet Transform, NSCT)<sup>[8-10]</sup>等。其中 NSCT 是一种有效的二维图像多尺度几何分析表示方法, 具有多分辨率、局域化、方向性、各向异性、平移不变和有效的实现等优点, 能够捕获自然图像中的几何结构信息, 相比小波变换, 它具备多个方向的基, 不局限于小波变换的 3 个方向, 同时基的支撑区间具有大小变化的长方形结构, 满足各向异性尺度关系; 相比 Contourlet 变换, 它没有采用 Contourlet 变换中二层滤波器组结构所包含的上采样和下采样操作, 因此满足平移不变性。

本文研究了 NSCT, 并提出了一种基于 NSCT 的全色图像和多光谱图像的遥感图像融合方法。一方面, 将 NSCT 这一新的多尺度几何分析工具引入到图像融合中, 扩展了 NSCT 的应用领域; 另一方面, 充分利用 NSCT 所具备的多尺度、多方向、平移不变等优势, 结合平稳小波变换 SWT<sup>[11]</sup>相对于小波变换所具备的平移不变性, 以及 IHS 变换, 在充分保留多光谱图像光谱信息的同时, 进一步增强融合图像的空间细节表现能力, 并能够避免因图像配准等因素造成的输入信号的少量偏移所引起的各个尺度下的小波系数发生剧烈变化等可能造成的图像失真, 如伪吉布斯现象, 提供了一种新的遥感图像融合方法。

## 2 非亚采样 Contourlet 变换——NSCT

NSCT 是一种灵活的多尺度、多方向、移不变的图像分解方法, 它的核心是不可分双通道非亚采样滤波器组(NonSubsampled Filter Bank, NSF B), 利用 NSF B 宽松的滤波器设计限制条件来设计滤波器, 这使得 NSCT 具有较 CT 更好的频率选择性和规则性。关于滤波器设计, 可参考文献[8]。为实现平移不变性, NSCT 构造在非亚采样金字塔滤波器(NonSubsampled Pyramid, NSP)和非亚采样方向滤波器组(NonSubsampled Directional Filter Bank, NSDFB)的基础上, NSP 实现多分辨率分解, NSDFB 实现多方向分解<sup>[8-10]</sup>。NSCT 构造原理如下。

(1)NSP NSCT 的多尺度属性是通过平移不变滤波结构获得, 但不同于 Contourlet 变换中的拉普拉斯塔式滤波结构, NSP 通过双通道 NSF B 实现。NSF B 没有上采样或下采样, 因此它是平移不变的。NSP 分解在概念上与用多孔算法实现一维非亚采样小波算法相近, 其冗余度为  $J+1$ ,  $J$  为分解层数。第  $j$  层低通滤波器的理想频率支撑区间为  $[-(\pi/2^j), (\pi/2^j)]^2$ , 相应地, 高通滤波器的支撑区间是低通支撑区间的补,  $[(-\pi/2^{j-1}), (\pi/2^{j-1})]^2 \setminus [(-\pi/2^j), (\pi/2^j)]^2$ 。第  $j$  层 NSP 的等价滤波器如下:

$$H_n^{eq}(z) = \begin{cases} H_1(z^{2^{n-1}}) \prod_{i=1}^{n-2} H_0(z^{2^i}), & 1 \leq n < 2^j \\ \prod_{i=0}^{n-1} H_0(z^{2^i}), & n = 2^j \end{cases} \quad (1)$$

其中  $z^i \equiv [z_1^i, z_2^i]$ 。对于下一层, 对所有的滤波器在两个方向上进行上采样, 使用上采样后的滤波器  $H(z^M)$  进行滤波的计

算复杂度与使用  $H(z)$  和多孔算法的计算复杂度相同。

(2)NSDFB NSDFB 是在 Contourlet 变换中临界采样二维方向滤波器组结构的平移不变版本, 通过消去 DFB 中的上采样和下采样获得。NSDFB 通过双通道 NSF B 实现, 但频率响应不同。

NSCT 非常灵活, 允许在某个尺度上任意  $2^l$  个方向数的分解; 满足各向异性尺度规则; NSCT 的冗余度为  $1 + \sum_{j=1}^J 2^{l_j}$ , 其中  $l_j$  代表第  $j$  层尺度上的树状结构分解层数。

## 3 基于 NSCT 和 SWT 的遥感图像融合方法

### 3.1 融合规则的选取

融合规则的选取在图像融合中至关重要, 它直接影响最终融合的效果。融合规则一般分为 3 类: 基于像素的融合、基于邻域窗口的融合和基于区域的融合<sup>[3]</sup>。基于像素的融合规则以单个像素为比较对象。基于邻域窗口的融合规则以邻域窗口为考察对象, 利用一个小的中心位于当前像素的掩模窗口计算邻域内的统计特性, 如梯度、方差、局部能量等。在一个邻域窗口内, 统计特性越明显, 说明图像灰度级变化越大, 细节越丰富, 本文即采用该规则。基于区域的融合规则以图像分割后的区域为研究对象, 每个区域对应一个目标或目标的一部分, 是融合中富含信息的部分。

### 3.2 局部平均梯度算子

人眼视觉系统对局部灰度变化敏感, 而非对灰度值敏感。在对图像进行多分辨率分解之后, 高频子带图像反映源图像的细节, 通过比较对应位置的灰度变化情况, 选择能表达出尽可能多的细节信息的小波系数作为融合图像的小波系数, 能够达到在保持光谱信息的同时增强空间细节表现能力。局部平均梯度可以计算当前像素在其邻域表现出的灰度变化, 反映边缘信息, 进而反映空间细节, 增强可分辨性。

本文采用  $3 \times 3$  空域掩模窗口方法。得到掩模窗口中心像素的局部平均梯度的方法有 Roberts 交叉梯度算子和 Sobel 算子<sup>[12]</sup>。Roberts 交叉梯度算子的优点是计算简单、速度较快, Sobel 算子的优点是计算较简单、速度较快, 抗噪声性强, 能够捕获较好的边缘信息。

### 3.3 遥感图像融合算法

在对高空间分辨率全色图像  $P$  和低空间分辨率多光谱图像  $M$  进行融合之前, 首先要对两幅图像进行精确的几何配准, 并把多光谱图像  $M$  重采样到与全色图像  $P$  同样的大小。

基于 NSCT 和 SWT 的遥感图像融合算法如下:

(1)利用 IHS 变换将  $M$  从 RGB 彩色空间转换到 IHS 空间, 并得其 3 个分量: 亮度分量  $M_i$ , 色调分量  $M_h$  和饱和度分量  $M_s$ 。本文采用文献[13]的方法进行 IHS 变换:

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & 2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H = \tan^{-1}(V_1/V_2) \quad (3)$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (4)$$

(2)对  $P$  按  $M_i$  进行直方图匹配,得到新的图像  $P'$ ,使其直方图大致相同于  $M_i$  的直方图。

(3)对  $P'$  和  $M_i$  分别做 NSCT 变换,得到相应的低频近似系数和细节系数  $\{A_p(x,y), D_p(j,k,x,y)\}$  和  $\{A_{M_i}(x,y), D_{M_i}(j,k,x,y)\}$ , 其中  $j, k, (x,y)$  分别代表 NSCT 的分解尺度、方向数和位置参数。

(4)基于 SWT 变换对低通图像  $A_p$  和  $A_{M_i}$  再次进行融合,得到融合后的低通低频图像  $A_{F_i}(x,y)$ 。对  $A_p$  和  $A_{M_i}$  进行 SWT 变换后,得到系数  $\{A'_p(x,y), D'_p(j,k,x,y)\}$  和  $\{A'_{M_i}(x,y), D'_{M_i}(j,k,x,y)\}$ ; 对于其中的低频系数,采用绝对值最大规则进行融合:

$$A'_{F_i}(x,y) = \begin{cases} A'_p(x,y), & |A'_p(x,y)| > |A'_{M_i}(x,y)| \\ A'_{M_i}(x,y), & |A'_p(x,y)| \leq |A'_{M_i}(x,y)| \end{cases} \quad (5)$$

对于高频系数,采用 Roberts 局部平均梯度融合规则进行融合:

$$D'_{F_i}(j,k,x,y) = \begin{cases} D'_p(j,k,x,y), & G_{D'_p}(j,k,x,y) > G_{D'_{M_i}}(j,k,x,y) \\ D'_{M_i}(j,k,x,y), & G_{D'_p}(j,k,x,y) \leq G_{D'_{M_i}}(j,k,x,y) \end{cases} \quad (6)$$

其中  $D'_{F_i}(j,k,x,y)$  为融合带通图像,  $G_I(j,k,x,y)$  代表在  $j$  尺度  $k$  方向上位置为  $(x,y)$  的像素点的 Roberts 局部平均梯度。之后,对于所得到的低频和高频系数  $A'_{F_i}(x,y), D'_{F_i}(j,k,x,y)$  进行逆向 SWT 变换,得到  $A_{F_i}(x,y)$ 。

(5)对于步骤(3)中的带通图像即高频系数  $D_p(j,k,x,y)$  和  $D_{M_i}(j,k,x,y)$  根据 Sobel 局部平均梯度融合规则进行融合:

$$D_{F_i}(j,k,x,y) = \begin{cases} D_p(j,k,x,y), & G_p(j,k,x,y) > G_{M_i}(j,k,x,y) \\ D_{M_i}(j,k,x,y), & G_p(j,k,x,y) \leq G_{M_i}(j,k,x,y) \end{cases} \quad (7)$$

其中  $D_{F_i}(j,k,x,y)$  为融合带通图像,  $G_I(j,k,x,y)$  代表图像在  $j$  尺度  $k$  方向上位置为  $(x,y)$  的像素点的 Sobel 局部平均梯度。

(6)对  $A_{F_i}(x,y)$  和  $D_{F_i}(j,k,x,y)$  利用 NSCT 逆变换进行图像重构,得一灰度图像  $F_i$ ,将其作为融合图像的亮度分量。

(7)利用步骤(6)所得的亮度分量  $F_i$ ,结合步骤(1)所得的色调分量  $M_h$  和饱和度分量  $M_s$  进行逆向 IHS 变换,得到融合后的高空间分辨率多光谱图像  $F$ 。

#### 4 实验结果及分析

实验采用某地区 SPOT 4 卫星的地面分辨率为 10m 的全色图像,和 Landsat TM 的分辨率为 30m 的多光谱图像作为融合实验数据,大小为  $256 \times 256$  像素,其中多光谱图像是波段号为 1, 2, 3 的 3 个波段合成的彩色图像。图 1(a), 1(b) 所示为全色图像和多光谱图像。

另外,为了对实验结果进行比较分析,验证本文遥感图

像融合算法的有效性,另外采用 3 种方法对 SPOT 图像和 TM 图像进行融合:方法 1:基于 IHS 变换的融合方法;方法 2:基于小波变换的融合方法;方法 3:基于双树复小波变换 DT-CWT 的融合方法;方法 4:基于 Contourlet 变换的融合方法。其中方法 2 和方法 4 中的融合规则采用文献[14]中实验论证的效果较好的简单融合规则,即对低频系数取平均,对高频系数选取具有较大绝对值的系数;方法 3 的融合规则为对低频系数取平均,对高频系数采用文献[15]的方法,即选取具有相应复数形式模最大者的系数。方法 2 中,小波基采用“9-7”对称双正交小波,分解层数为 4 层;方法 3 中,第 1 层分解采用长度为“13-19”的近似对称滤波器,对第二层及以上分解采用“14-14”Q-shift 滤波器<sup>[16]</sup>,分解层数为 4 层;方法 4 中,Contourlet 变换中的拉普拉斯塔式滤波器结构采用“9-7”对称双正交小波,分解层数为 4 层,二维方向滤波器组结构采用“23-45”双正交五株滤波器,最细尺度的分解方向数为 16;本文方法中,NSCT 变换的 NSP 采用“9-7”对称双正交小波,分解层数为 4 层,NSDFB 采用“23-45”双正交 5 株滤波器,最细尺度的分解方向数为 16。图 1(c)显示了方法 1 得到的融合结果,图 1(d)为本文方法得到的融合图像。

对于实验结果,从视觉效果上来看,在频谱信息表现方面,4 种比较方法得到的融合结果分别有不同程度的颜色失真,其中 IHS 方法较为严重,相应地,基于本文方法得到的融合结果效果较好;在空间细节信息表现方面,4 种比较方法和基于本文方法得到的融合结果的效果相当。

为进一步对融合效果进行评价,本文采用以下几个评价指标对图像质量进行定量分析:

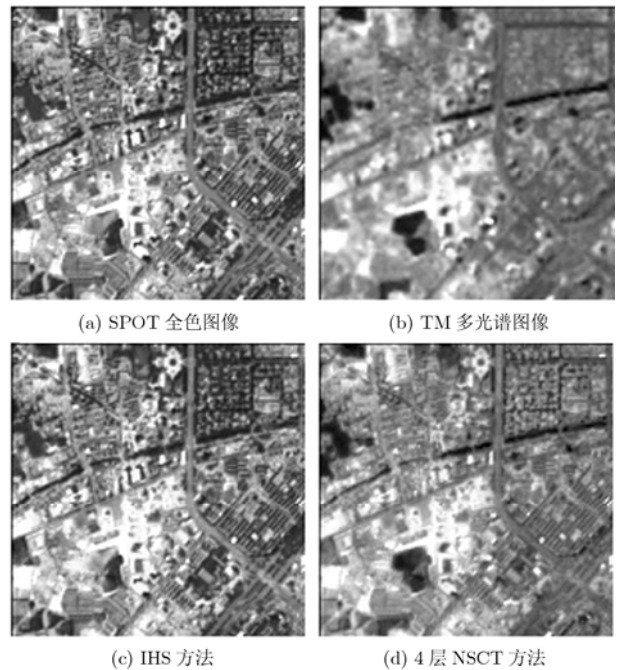


图1 遥感图像及融合图像

表 1 实验结果

		多光谱图像	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	本文方法
SD	R	0.1909	0.1785	0.1879	0.1840	0.1869	0.1864
	G	0.2155	0.2462	0.2410	0.2385	0.2407	0.2182
	B	0.1929	0.2322	0.2239	0.2221	0.2239	0.1973
PSNR	R		65.1468	66.7489	66.5191	66.6523	70.4852
	G		66.9534	68.6147	68.1444	68.5452	73.0143
	B		66.1220	67.8166	67.4786	67.9507	72.6971
CC	R		0.7265	0.8140	0.8011	0.8093	0.9190
	G		0.8857	0.9203	0.9084	0.9187	0.9656
	B		0.8408	0.8945	0.8749	0.8908	0.9544
RASE		6.4806	5.3086	5.5683	5.3709	3.2850	

(1) 峰值信噪比 (Peak Signal Noise Rate)

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2 MN}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R(i, j) - F(i, j))^2} \quad (8)$$

(2) 标准差 (Standard Deviation)

$$\text{SD} = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - u)^2 \right)^{1/2}, \quad u = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (9)$$

(3) 相关系数 (Correlation Coefficient)

$$\text{CC} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R(i, j) - \bar{R})(F(i, j) - \bar{F})}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R(i, j) - \bar{R})^2 \right) \left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F(i, j) - \bar{F})^2 \right)}} \quad (10)$$

(4) 相对平均频谱误差<sup>[2]</sup> (Relative Average Spectral Error)

$$\text{RASE} = \frac{100}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{RMSE}^2(B_i)} \quad (11)$$

其中  $\text{RMSE}^2(B_i) = \text{bias}^2(B_i) + \text{SD}^2(B_i)$ , bias 为偏差,  $B_i$  为波段,  $N$  为波段数,  $M$  为各波段均值。

峰值信噪比主要反映了空间细节信息, 而标准差、相关系数和相对平均频谱误差则主要反映了频谱信息。其中标准差指标越小, 说明融合图像的频谱质量越好<sup>[1]</sup>; 相关系数反映了融合图像从多光谱图像中保留的频谱信息的程度, 数值越大, 频谱质量越好; 相对平均频谱误差反映了融合图像的全局频谱质量, 数值越小, 频谱质量越好。

从表 1 的实验结果可以看出, 在图像质量定量分析方面, 本文提出的融合方法在 4 个评价指标即峰值信噪比、标准差、相关系数和相对平均频谱误差方面所取得的效果明显均优于基于 IHS 变换、小波变换、双树复小波变换、Contourlet 变换的融合方法。

本文方法的一个不足之处在于, 由于 NSCT 变换的目的是实现平移不变性, 其 NSP 和 NSDFB 结构的每一阶段滤波均产生一幅与源图像大小相同的低通或带通图像, 再利用这些图像进行基于绝对值最大规则或局部平均梯度的图像融合, 运算量较大, 占用内存, 相对其它融合方法, 其运算

时间较长。

## 5 结束语

本文提出了一种新的基于 NSCT 和 SWT 的遥感图像融合方法。由于 NSCT 和 SWT 均具备平移不变性, 故本文方法具有移不变性质, 防止产生伪吉布斯现象等图像失真, NSCT 更有效的利用了图像的几何结构信息, 运用 SWT 则进一步提取了源图像的空间细节信息。实验结果表明, 不论从视觉效果还是图像质量定量分析方面, 本文方法均优于传统的基于 IHS 变换、小波变换、双树复小波变换及 Contourlet 变换的融合方法, 该方法是有效可行的。

## 参考文献

- [1] Choi Myungjin, Kim Rae Young, and Nam Myeong-Ryong, *et al.* Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the Curvelet transform. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 136-140.
- [2] 张强, 郭宝龙. 基于成像系统物理特性的多光谱图像与全色波段图像融合. *光学学报*, 2007, 27(2): 243-248.  
Zhang Qiang, Guo Bao-long. Fusion of multispectral and panchromatic images based on the physical characteristics of imaging system. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 243-248.
- [3] Zhang Zhong and Blum Rick S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application. *Proc. IEEE*, 1999, 87(8): 1315-1326.
- [4] Do Minh N and Vetterli Martin. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [5] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望. *电子学报*, 2003, 31(12A): 1975-1981.  
Jiao Li-cheng and Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12A): 1975-1981.
- [6] Lu Yue and Do Minh N. CRISP-contourlets: A critically sampled directional multisolution image representation.

- Proceedings of SPIE, San Diego, 2003: 655-665.
- [7] 李广鑫, 王珂. 基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法. 电子学报, 2007, 35(1): 112-117.
- Li Guang-xin and Wang Ke. Color image fusion algorithm using the contourlet transform. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(1): 112-117.
- [8] Da Cunha Arthur L, Zhou Jiangping, and Do Mihn N. The nonsubsamped contourlet transform: theory, design and applications. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [9] Zhou Jiangping, Da Cunha Arthur L, and Do Mihn N. Nonsubsampled contourlet transform: construction and application in enhancement. International Conference on Image Processing, Genova, 2005: 469-472.
- [10] Da Cunha Arthur L, Zhou Jiangping, and Do Mihn N. Nonsubsampled contourlet transform: filter design and applications in denoising. International Conference on Image Processing, Genova, 2005: 749-752.
- [11] Nason G P and Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical application. In: *Wavelet and Statistics, Lecture Notes in Statistics*. Berlin: Springer Verlag, 1995: 281-300.
- [12] Gonzalez Rafael C and Woods Richard E. *Digital image processing (second edition)*, New York: Prentice-Hall, 2003: 105-107.
- [13] Wang Zhijun, Ziou Djemel, and Armenakis Costas, *et al.* A comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(6): 1391-1402.
- [14] Wang Weiwei, Shui Penglang, and Song Guoxiang. Multifocus image fusion in wavelet domain. International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Xi'an, 2003: 2887-2890.
- [15] 刑帅, 谭兵, 徐青等. 基于复数小波变换的遥感图像融合新算法. 武汉大学学报信息科学版, 2007, 32(1): 75-77.
- Xing Shuai, Tan Bing, and Xu Qing, *et al.* A new algorithm for remote sensing image fusion using complex wavelet transform. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1): 75-77.
- [16] Kingsbury Nick. Complex wavelet for shift invariant analysis and filtering of signals. *Journal of Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2001, 10(3): 234-253.
- 时海亮: 男, 1981 年生, 助教, 硕士生, 研究方向为图像融合、图像识别.
- 方敏: 女, 1965 年生, 教授, 博士, 研究方向为网络与智能信息处理.
- 梁锦锦: 女, 1983 年生, 博士生, 研究方向为最优化理论方法及其应用、数据挖掘和支持向量机.