

非下采样方向滤波器组在遥感图像融合中的应用

李俊峰 李其申 张永 江泽涛

(南昌航空大学计算机学院, 南昌 330063)

摘要 利用具有平移不变性的非下采样方向滤波器组(NSDFB),结合具有平移不变性的 \grave{a} trous 小波变换,提出了一种基于 NSDFB 的低分辨率多光谱图像和高分辨率全色图像的融合方法。将多光谱图像亮度、色度、饱和度(IHS)色彩空间的 I 分量和全色图像(PAN)分别进行 \grave{a} trous 小波变换,并对得到的高频系数分别进行 NSDFB 分解,从而得到多方向的高频信息,然后将高低频系数分别通过一定的融合算子进行融合、重构,得到 I' 分量,最后通过 IHS 逆变换得到融合图像。实验结果表明,在几种不同的客观评价标准下,该方法优于传统的 IHS、主成分分析法(PCA)和小波变换方法的融合效果,能有效地改善主成分分析法(PCA)和小波变换所带来的虚假边缘和光谱扭曲现象。

关键词 图像融合 非下采样方向滤波器组 \grave{a} trous 小波变换 光谱扭曲

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)10-2047-07

The Non-subsampled Directional Filter Bank and Its Application in Remote Sensing Image Fusion

LI Jun-feng, LI Qi-shen, ZHANG Yong, JIANG Ze-tao

(School of Computing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract The constructure of nonsubsamped directional filter bank (NSDFB) which is a full shift invariant is introduced, and a novel image fusion scheme based on NSDFB combining \grave{a} trous wavelet transform for multispectral image (MS) and panchromatic image (PAN) is proposed. The intensity component I of MS obtained by intensity, hue and saturation (IHS) transform and the PAN are decomposed using \grave{a} trous wavelet, and the high pass-bands are decomposed in multi-directional high pass-bands respectively by NSDFB. Then the high pass-bands and low pass-bands are fused by different fusion rules, and the I' component is reconstructed by taking inverse NSDFB decompose and inverse \grave{a} -trous wavelet transform. Finally, the fusion image is obtained by inverse IHS transform of I' and the H, S component of MS. The experimental results show that the performance of the novel algorithm is better than IHS, principal component analysis (PCA) and the traditional fusion algorithms based on wavelet transformation, and especially can effectively eliminate the spectral distortion caused by PCA and wavelet transform.

Keywords image fusion, nonsubsamped directional filter bank, \grave{a} trous wavelet transform, spectral distortion

1 引言

小波变换在信号处理领域得到了广泛应用,其优势主要体现在 1 维信号的奇异性检测上。对 2 维

信号,小波变换是以 1 维小波张量积形成,以“点”奇异逼近“线”奇异,这样就不能稀疏地表达 2 维信号的奇异性特征。另外,小波变换的方向性有限,只能检测水平、垂直、对角线 3 个方向的细节信息^[1-3]。为此,Do 等人提出了 Contourlet 变换^[4-5]。

基金项目: 国家自然科学基金(60673055)

收稿日期:2007-12-17; 改回日期:2008-07-15

第一作者简介:李俊峰(1982 ~),男,南昌航空大学计算机应用技术专业硕士研究生。主要研究方向为图像处理与模式识别。E-mail: jilee2006@sina.com

该变换具有灵活的局部性和方向选择性,且继承了小波变换多尺度多分辨率分解的特性。但由于 Contourlet 变换的方向滤波器组不满足平移不变性,其基函数光滑度不理想,易产生频谱混叠和虚假边缘现象^[6]。为此,本文引入一种满足平移不变性的非下采样方向滤波器组(nonsampled directional filters bank, NSDFB),该滤波器组去除了传统方向滤波器组中的下采样因子,满足平移不变性^[6]。

低分辨率多光谱图像和高分辨率全色图像是常见的卫星遥感影像。多光谱图像具有丰富的光谱信息,但空间分辨率比较低,全色图像具有空间高分辨率,却缺乏丰富的光谱信息。将两者进行融合,可使融合图像既具有多光谱特性又具有空间高分辨率^[7-8]。现有的遥感图像融合方法主要有基于 IHS 变换^[9]、主成分分析(PCA)方法^[10]及结合 IHS 的小波变换等方法^[11-12],这些方法为改善图像光谱质量和空间分辨率提供了有效的途径^[13-14]。

本文结合具有平移不变性的 à trous 小波变换方法^[13],将 NSDFB 应用到遥感图像的融合中,有效地改善了小波变换和 PCA 方法在图像融合中的虚假边缘及光谱扭曲现象。

2 非下采样方向滤波器组(NSDFB)

NSDFB 是将图像频谱分解成各个方向的楔形区域,但与传统方向滤波器组采用下采样因子不同的是,NSDFB 采用上采样操作^[6]。NSDFB 利用互补扇形滤波器作为基本模块,对其进行上采样和线性变换而得到具有不同方向支撑域的滤波器组。图 1 所示为双通道互补扇形滤波器 U_0 和 U_1 :

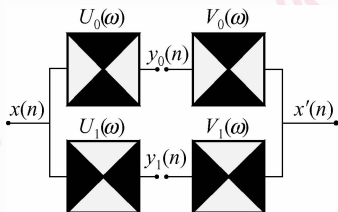


图 1 互补扇形滤波器

Fig. 1 The complementary fan filters

若使分解后能完全重构,扇形滤波器必须满足条件: $U_0(\omega)V_0(\omega) + U_1(\omega)V_1(\omega) = 1$ 。 $U_0(\omega)$ 和 $U_1(\omega)$ 是以 1 维分数阶样条正交滤波器为原型,在 McClellan 变换中利用映射函数 $f(\omega_1, \omega_2) = (\cos\omega_2 -$

$\cos\omega_1)/2$ 而得到的。1 维分数阶样条正交滤波器的定义为

$$\begin{cases} U_\lambda(\omega) = \frac{(2 + 2\cos\omega)^{\lambda/2}}{\sqrt{(2 + 2\cos\omega)^\lambda + (2 - 2\cos\omega)^\lambda}} \\ V_\lambda(\omega) = \frac{(2 - 2\cos\omega)^{\lambda/2}}{\sqrt{(2 + 2\cos\omega)^\lambda + (2 - 2\cos\omega)^\lambda}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $U_\lambda(\omega)$, $V_\lambda(\omega)$ 分别为 1 维低通和高通滤波器。将函数 $f(\omega_1, \omega_2)$ 代入式(1)得到扇形滤波器组:

$$\begin{cases} U_0(\omega_1, \omega_2) = V_0(\omega_1, \omega_2) = V_\lambda(\omega) \Big|_{\cos(\omega) = f(\omega_1, \omega_2)} \\ = (2 - 2\cos\omega)^{\lambda/2} / \sqrt{(2 + 2\cos\omega)^\lambda + (2 - 2\cos\omega)^\lambda} \\ U_1(\omega_1, \omega_2) = V_1(\omega_1, \omega_2) = U_\lambda(\omega) \Big|_{\cos(\omega) = f(\omega_1, \omega_2)} \\ = (2 + 2\cos\omega)^{\lambda/2} / \sqrt{(2 + 2\cos\omega)^\lambda + (2 - 2\cos\omega)^\lambda} \end{cases} \quad (2)$$

分析其频率响应可知, λ 取值影响 $U_0(\omega_1, \omega_2)$ 和 $U_1(\omega_1, \omega_2)$ 的响应频率, λ 越大, $U_0(\omega_1, \omega_2)$ 和 $U_1(\omega_1, \omega_2)$ 频率响应越接近理想扇形滤波器,由于 $U_0(\omega_1, \omega_2)V_0(\omega_1, \omega_2) + U_1(\omega_1, \omega_2)V_1(\omega_1, \omega_2) = 1$,该扇形滤波器组符合重构条件。然后对扇形滤波器进行 Quincunx 矩阵 Q 和幺模矩阵 R_i ($i=0,1,2,3$)上采样操作,可得到棋盘滤波器和平行四边形滤波器。图 2 所示为扇形滤波器分别经过 Q 上采样和 R_1 上采样所得到的棋盘滤波器和平行四边形滤波器,其中矩阵 Q 和 R_i ($i=0,1,2,3$)分别为

$$\begin{aligned} Q &= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \\ R_0 &= \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ R_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, R_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

多方向非下采样滤波器组可由图 2 中的 3 个基本滤波器级联而成。如四方向非下采样滤波器组是利用扇形滤波器与棋盘滤波器级联而成的,如图 3 所示。而八方向非下采样滤波器组是利用四方向滤波器组和平行四边形滤波器级联而成,依此类推。

不难看出,上述变换是可逆的,其重构滤波器组的构造与分解滤波器组的构造类似。

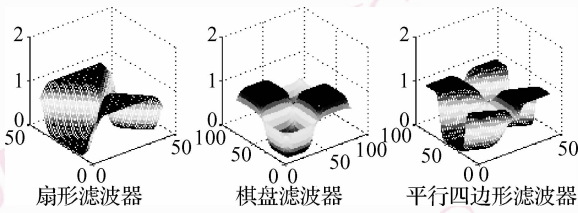


图 2 滤波器对应的频率响应

Fig. 2 Frequency response of filters

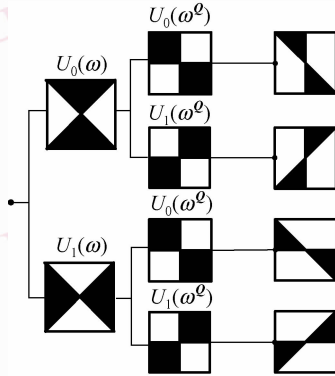


图 3 四方向非下采样滤波器组

Fig. 3 The four directions nonsubsampling filter band

3 基于 NSDFB 的遥感图像融合

àtrous 小波变换是一种二进小波变换,在变换中没有对分解的下一级图像进行下采样操作,该变换具有各向同性和平移不变性。

àtrous 小波变换的方法是:利用低通滤波器 h_0 作为尺度函数与图像 P 进行卷积可以得到图像 P 的近似图像序列 p_1, \dots, p_N ,其中作为卷积核的 h_0 可由 3 次 B 样条函数得到,如 1 维尺度的 h_0 为: $h_0 = (1/16) * [1, 4, 6, 4, 1]$ 。图像 P 及近似图像序列间在 h_0 作用后的差别,即细节信息 dw_j 可通过相邻近似图像的差值计算得到,即 $dw_j = p_{j-1} - p_j$,其中 $j = 1, \dots, N, p_0 = P$ 。这样重构公式可写为

$$P_r = p_N + \sum_{j=1}^N dw_j \quad (3)$$

其中 P_r 为重构图像, N 为分解层数^[14]。

可以看出,àtrous 小波变换能够有效实现多分辨率分解,但缺乏多方向性。由上述可知,NSDFB 既满足平移不变性,又继承了多方向分解的优点,能检测图像多个方向的细节信息,这为图像融合提供

了有利条件。但因其缺乏多分辨率分解的特性,因此,将 àtrous 小波变换作为多分辨率分解工具,再结合满足平移不变性的 NSDFB 多方向分解的优点处理图像融合问题,有着显然的优势。本文将其运用于多光谱图像和全色图像融合中,使融合图像既具有多光谱性,又具有高空间分辨率^[15-17]。上述思想的融合步骤如下:

(1) 将多光谱图像 M 的 3 个光谱波段 (R, G, B) 转换为 IHS 色彩空间,得到 3 个分量 I, H, S 。

(2) 将多光谱图像分量 I 和全色图像 P 进行直方图匹配,使其像素值具有相近的均值和方差。

(3) 分别对分量 I 和图像 P 进行 àtrous 小波分解,得到各自的高低频分量,对高频分量分别进行 NSDFB 分解,得到不同方向的高频信息。高、低频系数记为: $\{c_{P,j}, d_{P,j,k}^l\}$ 和 $\{c_{I,j}, d_{I,j,k}^l\}$,其中 $c_{X,j}$ 为对 X 分解 J 层的低频系数, $d_{X,j,k}^l$ 为 X 第 j 层第 k 方向的高频系数, ($X = P, I$), l_j 为第 j 层分解的方向数, $j = 1, 2, \dots, J, k = 1, 2, \dots, l_j$ 。àtrous 小波分解层数和每层高频分量分解方向数可依需要确定,一般分解为 3~4 层,第 1 层方向数取 8,其他各层取 4。

(4) 对得到的高低频系数采用不同的规则进行融合处理。其中低频系数采用加权平均法:

$$c_{F,j} = w_l \times c_{I,j} + w_p \times c_{P,j} \quad (4)$$

式中, $c_{F,j}$ 为低频融合系数, w_p, w_l 分别为图像 P 和分量 I 的低频系数的融合权值,它们可根据各系数能量的占有比例得到:

$$\begin{cases} w_p = E(c_{P,j}) / (E(c_{P,j}) + E(c_{I,j})) \\ w_l = E(c_{I,j}) / (E(c_{P,j}) + E(c_{I,j})) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $E(c_{P,j})$ 和 $E(c_{I,j})$ 分别为图像 P 和分量 I 的低频系数的能量。

对于高频系数,首先将某一级的某一方向分量进行分块,一般取 3×3 的窗口,根据子块的平均梯度特征显著性决定该块的权值,这样就可根据高频分量的局部特征改变相应子块的权值^[16-17]。设第 i 子块 $d_{X,j,k}^l$ ($X = P, I$) 对应的融合系数为 $d_{F,j,k}^l$,其表达式为

$$d_{F,j,k}^l = w_{i,j,k}^l \times d_{A,j,k}^l + (1 - w_{i,j,k}^l) \times d_{B,j,k}^l \quad (6)$$

其中权值 $w_{i,j,k}^l$ 表示第 j 层、第 k 方向系数的第 i 子块的权值,其计算公式为

$$w_{i,j,k}^l = \begin{cases} T & \mathbf{grad}(d_{A_i,j,k}^l) \geq \mathbf{grad}(d_{B_i,j,k}^l) \\ 1 - T & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中, T 为对应的阈值, $T \in (0, 1)$, 通常取 $0.4 \sim 0.9$, $\mathbf{grad}(d_{A_i,j,k}^l)$ 为第 i 子块的梯度值。

(5) 对融合后的高低频系数进行逆变换得到新的融合分量 \hat{I} , 将 \hat{I} 与多光谱图像 M 的分量 H, S 通过逆 IHS 变换转换到 RGB 空间, 得到融合图像 F 。

上述过程的总体流程如图 4 所示。

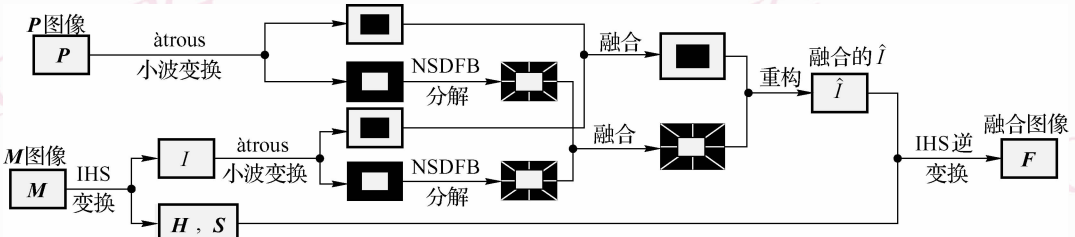


图 4 融合流程图

Fig. 4 The flow diagram of fusion process

4 实验及融合结果分析

大量实验证明, 本文提出的方法是有效的, 并且融合效果要优于所比较的方法。现选取两组图像进行说明。本文 NSDFB 融合方法的多分辨率分解采用 3 层 \grave{a} trous 小波变换, 对每一层高频分量做 NSDFB 分解, 各层的分解方向数分别是 8, 4, 4。实验结果表明, 高频系数融合的阈值 $T = 0.8$ 时, 得到的融合图像效果较好。NSDFB 方法的结果与离散小波变换 (DWT)、 \grave{a} trous 小波、IHS 和 PCA 方法进行了比较, 其中小波变换采用 “db4” 3 层分解, IHS 采用柱体变换方法。得到的融合图像如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 各种方法的融合图像既具有多光谱性, 又具有空间高分辨率。但 PCA 方法得到的融合图像色彩分布较源图像有较大扭曲, 空间分辨率也低于其他方法。IHS 方法得到的融合图像在空间分辨率上要稍逊于 DWT 方法和 NSDFB 方法。从图 5 中第 1 组图 (e)、图 (f)、图 (g) 可以看出, DWT 方法的融合图像在图像清晰度方面不如 NSDFB 方法, 例如图 5 中第 1 组中, 图像 (e) 左边矩形框内部分, 说明该图像清晰度和标准差要略差于 NSDFB 方法, 图像 (f) 的清晰度也不如图像 (g)。在图 5 第 2 组中, 图像 (e) 右边部分的图像细节不如图像 (g), 并且伴有假边缘现象, 而图像 (f) 右下部

分略显模糊。

为定量分析各种方法的融合效果, 本文采用信息熵、标准差、偏差、相关系数和交互信息量作为融合评价标准^[18]。表 1 列出了两组遥感图像在不同融合方法下得到的融合图像评价参数。

信息熵是衡量图像信息量的一个重要指标, 其值越大表明图像包含的信息量越大。标准差反映了图像灰度值相对于平均值的离散状况, 标准差越大, 图像灰度级分布分散, 图像信息就越多。偏差是融合图像与源图像灰度差值的平均值, 反映融合图像和源图像在光谱信息上的差异大小和光谱特性的变化程度, 是光谱扭曲程度的重要指数, 偏差越小说明融合效果越好, 光谱扭曲程度也就越低。相关系数是描述光谱特征相似性, 即保持光谱特性的能力, 融合结果光谱信息保持越多, 相关系数越大, 理想情况应接近于 1。交互信息量是变量间相关性的量度, 反映融合图像包含源图像信息量的量度, 其值越大融合图像从源图像中获取的信息量越大, 融合效果也就越好。

从表 1 可以看出, 在两组融合图像中, 本文提出的 NSDFB 方法的融合图像在信息熵、标准差、互信息量和相关系数上相比于其他方法为最大, DWT 方法次之, PCA 方法为最小, 说明 NSDFB 方法在信息量上、图像灰度分布、光谱保持能力及与源图像的相关性保持度上要优于其他方法。对于偏差, 在第 1 组图像中 NSDFB 方法要稍逊于 DWT 方法, 但仍优

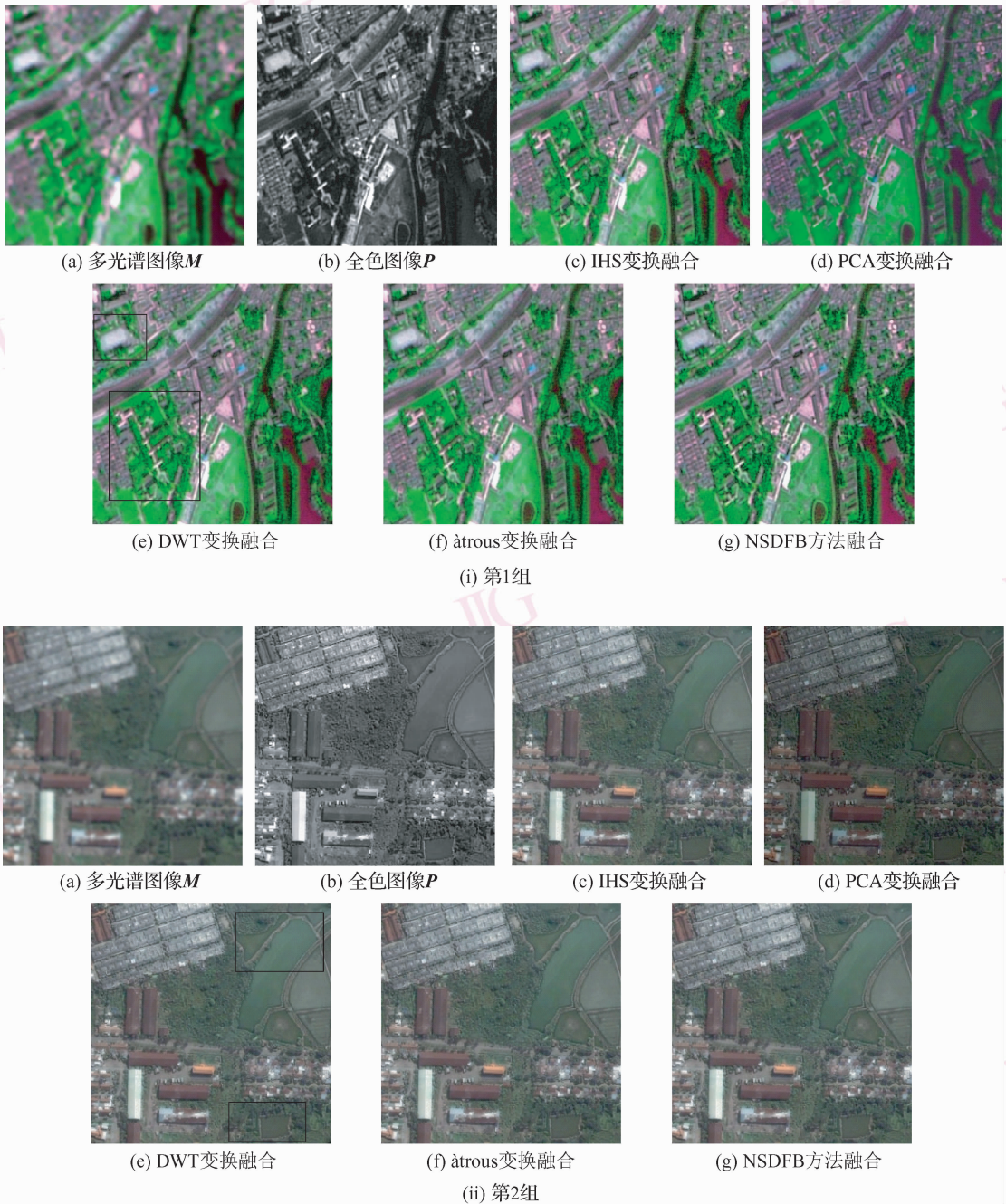


图 5 图像融合结果比较
 Fig. 5 Comparisons of fused images

于其他 3 种方法。而两组图像中,PCA 方法的偏差最大,说明其融合图像存在一定的空间信息扭曲,有虚假信息产生。IHS 方法较 PCA 方法的融合效果有一定改善,但偏差系数也较大。DWT 和 àtrous 变换方法较 PCA 和 IHS 方法有了很大进步,评价参数有较大提高,但在信息熵、标准差、相关系数、互信息量上都略差于 NSDFB 方法。àtrous 变换方法

在信息熵和标准差上要低于小波方法,但互信息量要优于小波,说明 àtrous 变换方法融合图像的信息量和清晰度要低于 DWT 方法,但与源图像的相关性要大于 DWT 方法。从以上实验结果分析看,本文的 NSDFB 融合方法在保持图像光谱特性和提高图像空间分辨率上要优于 IHS 方法、PCA 方法、àtrous 变换和小波变换方法。

表 1 融合图像的客观评价参数
Tab.1 Evaluations of the fused images

方法	第 1 组图像					第 2 组图像					
	信息熵	标准差	偏差	相关系数	互信息量	信息熵	标准差	偏差	相关系数	互信息量	
IHS	R	7.509 2	49.17	16.5	0.911 77	3.965	6.793 9	31.455	8.035	0.943 18	4.408 2
	G	7.288 6	39.41	33.234	0.732 11	4.179 9	6.732 6	30.012	8.301	0.941 07	4.133 9
	B	7.485 1	48.754	13.818	0.936 71	4.078 4	6.646 6	29.792	8.191 1	0.945 66	4.283 6
	平均	7.427 6	45.778	21.184	0.860 2	4.074 4	6.724 4	30.42	8.175 7	0.943 3	4.275 2
PCA	R	7.013 2	35.01	19.338	0.895 36	3.364 5	6.394 9	22.475	34.449	0.931 48	3.992 2
	G	7.097 2	34.24	32.201	0.663 03	4.101	6.294 3	21.501	36.225	0.934 8	3.728
	B	7.011 6	34.422	17.576	0.901 44	3.450 7	6.229 1	21.083	39.073	0.941 1	3.834 2
	平均	7.040 7	34.557	23.039	0.819 94	3.638 8	6.306 1	21.686	36.582	0.935 79	3.851 5
DWT	R	7.492 8	48.525	13.776	0.941 83	4.186 1	6.827 2	32.095	7.365 8	0.957 25	4.573 7
	G	7.365 9	41.361	30.927	0.759 01	4.272 1	6.737	30.518	7.062 7	0.961 17	4.307 8
	B	7.481 4	48.495	11.753	0.955 47	4.331 3	6.670 6	30.448	7.415 5	0.960 76	4.430 1
	平均	7.446 7	46.127	18.819	0.885 44	4.263 2	6.744 9	31.02	7.281 3	0.959 73	4.437 2
àtrous	R	7.488	48.308	13.858	0.940 65	4.199 3	6.824 6	32.015	7.311 5	0.957 91	4.590 4
	G	7.352 7	40.999	31.044	0.758 27	4.254	6.732 9	30.437	7.021 5	0.961 93	4.333 7
	B	7.478 4	48.275	11.77	0.955 76	4.347 4	6.665 7	30.37	7.360 2	0.961 46	4.45
	平均	7.439 7	45.861	18.89	0.884 89	4.266 9	6.741 1	30.94	7.231 1	0.960 44	4.458
NSDFB	R	7.497 8	48.808	13.856	0.941 54	4.250 8	6.834 8	32.381	7.262 7	0.958 64	4.618 7
	G	7.366 6	41.373	30.87	0.764 33	4.284 3	6.747	30.826	6.952 4	0.962 5	4.347 6
	B	7.487 2	48.761	11.75	0.956 61	4.391 9	6.677 7	30.725	7.297 3	0.962 2	4.497 1
	平均	7.450 5	46.314	18.825	0.887 5	4.309	6.753 2	31.31	7.170 8	0.961 11	4.487 8

5 结 论

介绍了非下采样方向滤波器组的构造、特性,分析了其在图像变换中具有平移不变性、改善频谱泄露及频谱重叠和具有多方向分解等优点,并结合具有平移不变性和多分辨率的 àtrous 小波变换,提出了一种新的遥感图像融合方法。该方法能更好地处理高维信号的奇异性,如轮廓、纹理等信息,可充分地挖掘待融合图像的方向信息。对比小波方法,它能够有效地改善小波光谱扭曲现象。与同样具有平移不变性的 àtrous 小波变换相比较,它能更好地检测图像奇异性,得到对比度更高,轮廓更清晰的融合结果。实验结果表明,在低分辨率多光谱图像和高分辨率全色图像的融合中,本文方法在信息熵、标准差、偏差、相关系数和互信息量上要优于 IHS,PCA, DWT 和 àtrous 小波方法。

参考文献 (References)

- 1 Do M N, Vetterli M. The finite redgelet transform for image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(1): 16-28.
- 2 Donoho D L, Duncan M R. Digital curvelet transform: strategy, implementation and experiments [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4056: 670-684.
- 3 Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- 4 Jiao Li-cheng, Tan Shan, Liu Fang. Ridgelet theory: from ridgelet transform to curvelet [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematic, 2005, 22(5): 761-773. [焦李成, 谭山, 刘芳. 脊波理论: 从脊波变换到 Curvelet 变换 [J]. 工程数学学报, 2005, 22(5): 761-773.]
- 5 Jiao Li-cheng, Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 1975-1981. [焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望 [J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975-1981.]
- 6 Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampling contourlet

- transform; theory, design and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, **15**(10): 3089-3101.
- 7 Wang Hai-hui, Peng Jia-xiong. A study of image fusion based on multiwavelet transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, **9**(8): 1002-1007. [王海晖, 彭嘉雄. 基于多小波变换的图像融合研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(8): 1002-1007.]
- 8 Ranchin T, Aiazzi B, Alparone L, *et al.* Image fusion-the ARSIS concept and some successful implementation schemes [J]. ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, **58**(1-2): 4-18.
- 9 Carper J W, Lillesand T M, Kiefer R W. The use of intensity-hue-saturation transformation for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, **56**(4): 459-467.
- 10 Chavez P S, Slides S C, Anderson J A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, **57**(3): 295-303.
- 11 Xiao Gang, Jing Zhong-liang, Li Jian-xun. Analysis of color distortion and improvement for IHS image fusion[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems[C], Shanghai, China, 2003: 80-85.
- 12 Shi Ai-ye, Xu Li-zhong, Huang Feng-chen. An improved image fusion method based on wavelet transform [J]. Journal of Apparatus and Meter, 2004, **25**(4): 690-691. [石爱业, 徐立中, 黄凤辰. 一种改进的基于小波变换的遥感图像融合方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, **25**(4): 690-691.]
- 13 Pohl C, Van Genderen J L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and application [J]. International Journal Remote Sensing, 1998, **9**(5): 823-854.
- 14 Wang Zhi-jun, Ziou Djemel. A comparative analysis of image fusion methods [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2005, **43**(6): 1391-1402.
- 15 Zheng Sheng, Shi Wen-zhong, Liu Jian, *et al.* Multisource image fusion method using support value transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, **16**(7): 1831-1839.
- 16 Hong Ri-chang, Wu Xiu-qing, Yuan Xun. Fusion of multispectral and panchromatic images based on biorthogonal multiwavelet transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, **12**(4): 684-690. [洪日昌, 吴秀清, 袁勋. 基于双正交多小波变换的多光谱与全色图像融合研究[J]. 中国图象图形学报, 2007, **12**(4): 684-690.]
- 17 Ma Yan-jun, Shi Ai-ye, Xu Li-zhong. Fusion of remote sensing images using region-based selection operator [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, **12**(2): 228-233. [马艳军, 石爱业, 徐立中. 基于区域特性选择的遥感图像融合方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, **12**(2): 228-233.]
- 18 Amolins Krista, Zhang Yun, Dare Peter. Wavelet based image fusion techniques—An introduction, review and comparison [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, **62**(4): 249-263.