

基于快速离散曲波变换的 TH-1 卫星影像融合方法

朱倩, 李霞

(长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054)

摘要:针对 TH-1 部分影像存在较大噪声的问题, 提出一种基于快速离散曲波变换 (fast discrete curvelet transforms, FDCT) 的卫星影像融合方法. 在融合处理过程中, 对于 FDCT 分解出的低频系数子带采用加权平均算法, 噪声较少的次高频子带采用最大区域边缘信息度量算法, 噪声较为集中的最高频子带采用最大值替换算法. 融合后的影像在常用影像质量评价指标统计值和去噪评价指标统计值两方面均显示, 该方法的融合效果相对传统方法优势明显.

关键词: TH-1; 快速离散曲波变换; 去噪; 影像融合; 影像评价

中图分类号: TP75; P627 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2013.08.006

引用格式: Zhu Qian, Li Xia. A fusion method for TH-1 images based on fast discrete curvelet transforms[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(8):639-644.
朱倩, 李霞. 基于快速离散曲波变换的 TH-1 卫星影像融合方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(8):639-644.

A fusion method for TH-1 images based on fast discrete curvelet transforms

ZHU Qian, LI Xia

(School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: As some TH-1 images have the problem of big noise, a fusion method for TH-1 images based on FDCT was proposed. During the fusion processing, the sub-band of low frequency was processed by the weighted average algorithm; the sub-band of middle frequency, which has lower noise, was processed by the biggest region edge detection algorithm; the sub-band of the highest frequency, which has more intensive noise, was processed by the maximum substitution algorithm. The proposed method clearly outperforms traditional fusion methods in common image evaluation indicators and noise reduction evaluation indicators.

Key words: TH-1; fast discrete curvelet transforms; noise reduction; image fusion; image quality evaluation

0 引言

TH-1 卫星是国家测绘局于 2010 年 8 月 24 日发射的遥感制图卫星. 该卫星覆盖范围宽, 可提供 2

m 高空间分辨率的全色影像 (PAN) 和 10 m 低空间分辨率的多光谱影像 (MS). 高空间分辨的 PAN 缺少光谱信息; 反之, 高光谱分辨率的 MS 又不具有很高的空间分辨率. 因此, 研究 TH-1 卫星 PAN 与

收稿日期: 2013-02-24; 修回日期: 2013-04-26

基金项目: 国家自然科学基金 (41101445) 资助.

作者简介: 朱倩 (通讯作者), 女, 1983 年生, 博士生. 研究方向: 遥感技术. E-mail: qian15086@st.chd.edu.cn

MS 的数据融合一直是 TH-1 卫星应用研究的一个重要方面^[1]. 因为 TH-1 部分影像存在噪声较大的问题, 且这些噪声用传统的影像融合方法难以去除, 所以严重影响了 TH-1 影像的应用. Starck^[2] 试验发现对于噪声较大的图像, 基于曲波(curvelet)变换的图像增强方式表现得比其他增强方式要突出, 但对于噪声较少或没有噪声的图像, 基于 curvelet 的增强方式相比基于小波(wavelet)变换的增强方式不具有明显优势. 因此, 本文利用 curvelet 变换对噪声较大图像的增强优势明显这一特征, 以 TH-1 遥感影像为试验对象, 提出一种基于快速离散曲波变换(fast discrete curvelet transforms, FDCT)的遥感影像融合方法, 以改进噪声较大的 TH-1 遥感影像的融合质量.

1 curvelet 变换

1.1 curvelet 变换

curvelet 变换是由 Candes 和 Donoho 于 1999 年提出的, 融合了 wavelet 变换的多尺度和脊波(ridgelet)变换的各向异性特点. 其主要思想是: 先对影像进行子带分解; 再对不同尺度的子带影像进行不同大小的分块; 最后将每个足够小的分块中的曲线近似看待为直线, 进行局部 ridgelet 变换. 该变换的缺点是数字实现比较复杂、数据冗余量大. 因此, Candes 等在 2004 年提出了更简单、更便于理解的第二代 curvelet 变换^[3]. 第二代 curvelet 变换与 ridgelet 变换没有任何关系, 两者的共同点只在于紧支撑、框架等抽象的数学意义. 第二代 curvelet 变换有连续 curvelet 和离散 curvelet 两种, 对频域窗口的表现方式不同, 如图 1 所示, 其中常用的是离散 curvelet 变换.

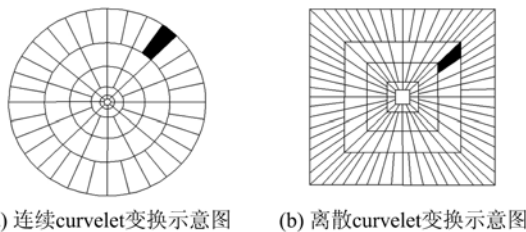


图 1 curvelet 变换示意图

Fig. 1 Sketch map of curvelet transforms

1.2 FDCT 及系数分析

Candes 等在文献[3]中提供了两种 FDCT 方法: 基于 USFFT(unequipped FFT)的变换法和基

于 wrapping 的变换法. 由于 USFFT 算法比 wrapping 方法计算量更大、速度更慢, 因此, 本文采用基于 wrapping 的变换法. FDCT wrapping 变换法实际上是在基于 USFFT 的方法上增加了 wrap 步骤.

(I) 对于给定的一个笛卡尔坐标下的二维函数进行二维 FFT 变换, 得到二维频域表示:

$$\hat{f}[n_1, n_2], -\frac{n}{2} \leq n_1, n_2 < \frac{n}{2} (j, l) \quad (1)$$

(II) 在频域, 对每一对尺度角度 (j, l) , 重采样 $\hat{f}[n_1, n_2]$, 得到采样值:

$$\hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_j], (n_1, n_2) \in P_j \quad (2)$$

(III) 将内插后的 \hat{f} 与窗函数 \tilde{U}_j 相乘得到

$$\hat{f}[n_1, n_2] = \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_j] \tilde{U}_j[n_1, n_2] \quad (3)$$

(IV) 围绕原点 wrapping 局部化 $\hat{f}[n_1, n_2]$.

(V) 针对 wrapping 局部化后的 $\hat{f}[n_1, n_2]$ 进行二维 FFT 逆变换, 由此即可得到 FDCT 系数集合 $C^p(j, l, k)$.

2 基于 FDCT 的遥感影像融合算法

经 FDCT 之后, 原始遥感影像被分解为多级别多方向的频带: 最内层为 coarse 层, 由低频系数组成; 最外层为 finest 层, 由高频系数组成; 中间的多个尺度层统称为 detail 层, 由多个方向的中高频系数组成. 利用该系数结构, 对不同尺度、不同方向上的频带采用不同的融合策略, 从而实现原始影像在多尺度、多方向上的信息融合. 融合的流程如图 2 所示, 具体步骤如下:

(I) PAN 和 MS 进行严格的空配准^[4], 并截取相同位置的相同大小图像.

(II) 用双线性内插法(bilinear)将低分辨率的 MS 重采样至高分辨率 PAN 相同的像素大小得到 MS'.

(III) 将 PAN 与 MS' 进行直方图匹配, 得到一个新的与 MS' 具有相同直方图分布的高分辨率全色影像 PAN'.

(IV) 对 MS' 和 PAN' 分别进行 J 级(一般取 $J = \log_2(\min(M, N)) - 3$, 其中 M, N 为影像矩阵的行列数)FDCT 得到不同频带范围内的 curvelet 系数. 示例影像分解前后的图形表示如图 3, 分解后的系数结构分布如表 1.

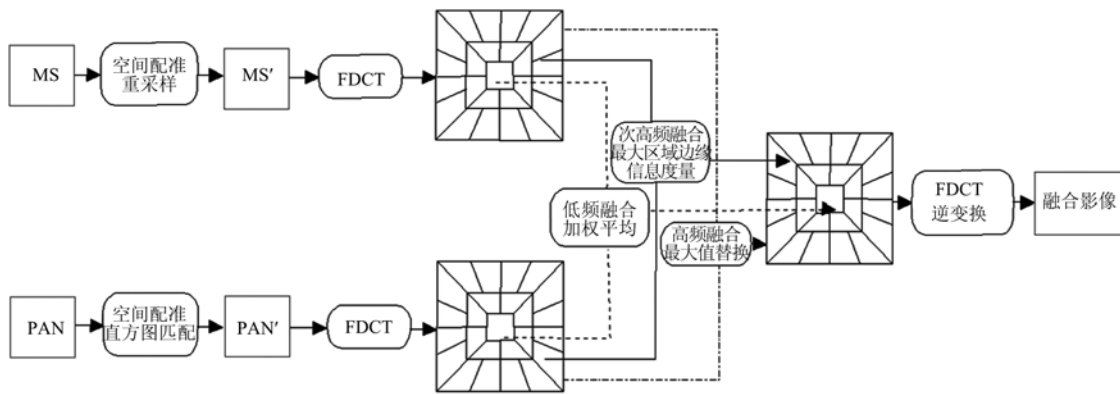


图 2 基于 FDCT 的影像融合流程图

Fig. 2 Flow chart of FDCT fusion

表 1 curvelet 系数结构分布表

Tab. 1 Structure of curvelet coefficients

层数	尺度系数	方向参数个数 $l=4 \times N$	矩阵形式 $m \times n(k)$			
coarse	C{1}		17×17			
	C{2}	16=4×4	14×17(4)	12×17(4)	17×14(4)	17×12(4)
	C{3}	32=4×8	27×17(4)	25×18(8)	25×17(4)	18×25(8)
detail			17×27(4)	17×25(4)		
	C{4}	32=4×8	53×34(4)	50×34(12)	34×50(12)	34×53(4)
	C{5}	64=4×16	103×34(4)	100×35(8)	100×34(20)	34×100(20)
finest	C{6}		35×100(8)	34×103(4)		

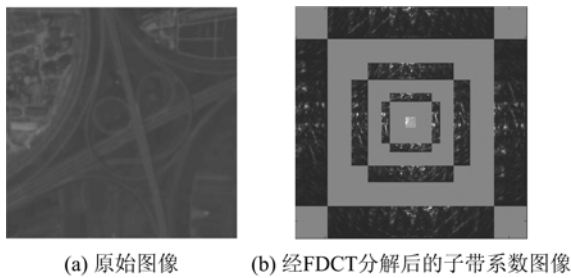


图 3 PAN 原始图像及其经 FDCT 分解后的子带系数

Fig. 3 Original PAN and sub-band coefficients decomposed by FDCT

(V) 对 MS' 和 PAN' 采用一定的融合规则对得到的 curvelet 变换系数进行组合, 得到融合影像的 curvelet 变换系数。

① 低频子带融合策略

低频子带主要体现的是影像的光谱特征, 因此, 对于低频子带的处理原则是既要保存低分辨率 MS' 的光谱特征, 同时尽可能地将高分辨率 PAN' 的细节特征添加到 MS' 中。本研究 coarse 层的融合策略为传统的加权平均算法^[5]得到最终的融合系数。计

算公式为

$$C_{\text{Fusion}}(i, j) = 0.5 * L_{\text{Pan}}(i, j) + 0.5 * L_{\text{Mul}}(i, j) \tag{4}$$

式中, $L_{\text{Pan}}(i, j)$ 和 $L_{\text{Mul}}(i, j)$ 为全色和多光谱影像经 curvelet 变换后得到的低频子带系数, $C_{\text{Fusion}}(i, j)$ 为 coarse 层的最终融合系数。

② 高频子带融合策略

高频子带 curvelet 系数的变化速度反映了图像特征细节信息的变化快慢。其中绝对值较大的 curvelet 系数对应着一些突变, 如图像边缘、纹理等特征。因此, 对于高频子带的融合原则是最大限度地保留原始图像的边缘和细节特征, 并采用局部处理的办法, 尽量减少噪声的影响。

对于含有噪声较少的 detail 层, 本研究的融合策略为最大区域边缘信息度量算法。具体方法为: 取一定大小的边缘检测模板(本研究选择拉普拉斯边缘检测模板), 对应方向的高频子带分别计算待融合影像区域边缘信息度量值的大小 $M_{i,k}^{\text{Pan}}$ 和 $M_{i,k}^{\text{Mul}}$, 然后选取区域边缘信息度量值较大的 curvelet 系数作为

融合后对应区域的中心点 curvelet 系数.

$$M_{l,k}^{\gamma}(i, j) = \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 W(m, n) C_{l,k}^{\gamma}(i + m, j + n) \quad (5)$$

式中, γ 代表不同的图像, $C_{l,k}^{\gamma}(i, j)$ 表示第 l 层第 k 个方向的高频系数, 区域中心为 (i, j) , $W(m, n)$ 为拉普拉斯边缘检测模板:

$$W(m, n) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

则融合后高频系数为

$$C_{l,k}^{\text{fusion}}(i, j) = \begin{cases} C_{l,k}^{\text{Pan}}(i, j), & |M_{l,k}^{\text{Pan}}(i, j)| > |M_{l,k}^{\text{Mul}_i}(i, j)| \\ C_{l,k}^{\text{Mul}_i}(i, j), & |M_{l,k}^{\text{Pan}}(i, j)| \leq |M_{l,k}^{\text{Mul}_i}(i, j)| \end{cases} \quad (7)$$

对于含噪声较为集中的 finest 层, 为最大限度地降低噪声的影响而更多地保留原始遥感图像的边线和细节特征, 本研究的融合策略为最大值替换算法. 计算公式为

$$H_{l,k}^{\text{fusion}}(i, j) = \begin{cases} H_{l,k}^{\text{Pan}}(i, j), & |H_{l,k}^{\text{Pan}}(i, j)| > |H_{l,k}^{\text{Mul}_i}(i, j)| \\ H_{l,k}^{\text{Mul}_i}(i, j), & |H_{l,k}^{\text{Pan}}(i, j)| \leq |H_{l,k}^{\text{Mul}_i}(i, j)| \end{cases} \quad (8)$$

式中, $H_{l,k}^{\text{Pan}}(i, j)$ 和 $H_{l,k}^{\text{Mul}_i}(i, j)$ 表示全色和多光谱影像经 curvelet 变换后得到的第 l 层第 k 个方向的高频系数, 区域中心为 (i, j) ; $C_{l,k}^{\text{fusion}}(i, j)$ 表示融合后高频系数大小.

(VI) 将经过上述处理的各子带进行 FDCT 逆变换, 即可得到融合后的影像.

3 影像去噪评价指标

本研究除了应用常用的影像质量评价指标光谱相关系数、结构相似度 SSIM^[6] (structural similarity)、通用图像质量评价指标 UIQI^[7] (universal image quality index) 之外, 还增加了对于影像去噪评价的指标. 假设用 $o(i, j)$ 和 $z(i, j)$ 分别表示像元 (i, j) 处原始影像与融合后影像中对应的灰度值或色彩值, MN 为 $M \times N$ 图像的总像素数. 则影像去噪评价的 4 个指标可表示如下:

(I) 均方误差

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [z(i, j) - o(i, j)]^2}{MN} \quad (9)$$

均方误差的值越小, 说明预测模型描述实验数

据具有更好的精确度, 在影像融合方法中, 具有越小的均方误差, 融合效果越好.

(II) 归一化均方误差

$$\text{NMSE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [z(i, j) - o(i, j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N o^2(i, j)} \quad (10)$$

归一化均方误差的值越小, 说明预测模型描述实验数据具有更好的精确度, 在影像融合方法中, 具有越小的归一化均方误差, 融合效果越好.

(III) 信噪比

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z(i, j)^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [z(i, j) - o(i, j)]^2} \quad (11)$$

信噪比值越高, 表明预测值的误差越小, 在影像融合方法中, 具有越大的信噪比值, 融合效果越好.

(IV) 峰值信噪比

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [z(i, j) - o(i, j)]^2} \quad (12)$$

峰值信噪比表示信号最大可能功率和影响它的表示精度的破坏性噪声功率的比值. 在影像融合方法中, 具有越大的峰值信噪比值, 融合效果越好.

4 不同融合方法的实验及质量评价

基于上述方法, 本研究对 2011 年 TH-1 的 PAN 和 MS 进行融合实验, 并与传统方法的融合效果进行了对比, 图 4 给出了具体结果. 其中图 4(a) 为原始 MS, 图 4(b) 为原始 PAN, 图 4(c)~(g) 为传统方法的融合结果, 4(h) 为本文基于 FDCT 的处理结果.

融合影像质量在定性和定量两方面评价的具体情况为: 从目视效果来看, 融合影像光谱扭曲度较低, 与传统方法的光谱保持度相当, 与表 2 中代表光谱保持度的光谱相关系数与传统方法接近的现象相符; 影像清晰度相对传统方法具有明显优势, 与表 2 中代表清晰度的平均梯度值较高一致; 在结构性的保持和综合质量水平方面, 本文融合方法具有显著的优势, 整个图面较为光滑细致, 与表 2 中代表结构保持度的结构相似度和代表综合质量水平的 UIQI 两个指标较高相吻合.

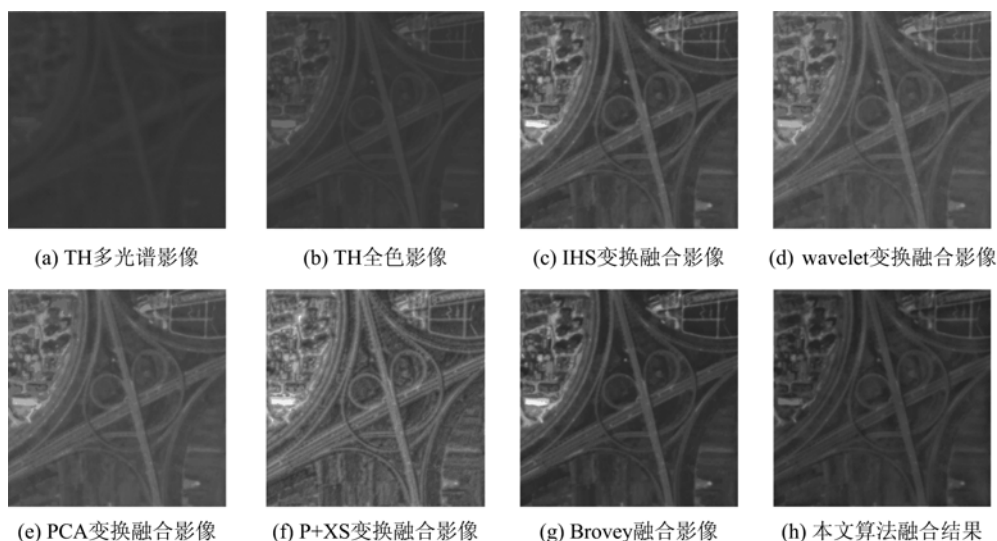


图 4 不同融合方法的 TH-1 影像

Fig. 4 Fused TH-1 images with different fusion methods

表 2 TH-1 融合影像质量基于常用影像质量评价指标的统计值

Tab. 2 Statistics of fused images evaluation based on common image evaluation indicators

评价指标	波段	融合方法					
		IHS	wavelet	PCA	P+XS	Brovey	本文融合法
光谱相关系数	R	0.769 3	0.925 8	0.814 9	0.833 8	0.792 4	0.739 2
	G	0.978 5	0.989 9	0.992 1	0.970 2	0.908 5	0.978 3
	B	0.987 8	0.994 5	0.995 4	0.985 7	0.944 0	0.986 6
	均值	0.911 9	0.970 0	0.934 2	0.929 9	0.881 6	0.901 4
平均梯度	R	3.042 4	3.982 7	2.521 1	4.533 6	3.525 0	4.749 4
	G	2.909 8	4.008 7	2.483 0	4.562 1	3.193 5	5.062 8
	B	2.918 4	4.101 0	2.523 6	4.554 8	3.128 5	5.359 9
	均值	2.956 8	4.030 8	2.509 2	4.550 1	3.282 3	5.057 4
结构相似度	R	1.151 9	1.141 7	1.120 7	0.901 0	1.204 8	1.597 6
	G	1.397 5	1.292 1	1.468 2	1.042 3	1.324 2	1.485 9
	B	1.330 5	1.283 0	1.455 8	1.070 4	1.232 2	1.377 4
	均值	1.293 3	1.238 9	1.348 3	1.004 5	1.253 7	1.487 0
UIQI	R	0.713 9	0.611 3	0.583 8	0.648 2	0.898 8	0.987 8
	G	0.896 7	0.698 7	0.856 8	0.741 5	0.914 4	0.967 1
	B	0.891 5	0.769 1	0.944 7	0.839 9	0.836 3	0.947 3
	均值	0.834 0	0.693 0	0.795 1	0.743 2	0.883 2	0.967 4

融合影像去噪在定性和定量两方面评价的具体情况为:从目视效果看,图面没有明显的突兀噪声点,整体光滑平整.从评价噪声的 4 个指标来看,本文方法对应的均方误差和归一化均方误差均远远小于传统方法,说明融合后的噪声较小;信噪比和峰值信噪比远远高于传统方法,再次证明融合后的噪声很小.

从定性和定量分析的结果看,由于考虑了不同方向、不同尺度、不同分辨率的影像特征,不同频率

系数范围采用不同的融合规则,既考虑了用局部处理的方法来保留细节特征,又对噪声进行了很好的分辨以及去除,使融合后图像更加真实、细腻,从而使 TH-1 影像的融合取得较好的效果.

5 结论

本文基于 FDCT 采用新的融合策略将 TH-1 的 PAN 与 MS 进行融合,并从定性和定量两方面与传统融合方法进行对比分析,得到如下结论:

表 3 TH-1 融合影像质量基于影像去噪评价指标的统计值

Tab. 3 Statistics of fused images evaluation based on image noise reduction evaluation indicators

评价指标	波段	融合方法					
		IHS	wavelet	PCA	P+XS	Brovvey	本文融合法
均方误差	R	3 697.419 0	6 045.429 4	6 907.608 6	5 216.763 7	1 190.248 6	112.786 0
	G	727.674 0	2 243.637 0	846.876 4	1 993.451 5	522.811 4	151.463 3
	B	449.532 2	1 397.176 4	261.313 2	1 037.073 4	476.161 2	193.646 8
	均值	1 624.875 1	3 228.747 6	2 671.932 8	2 749.096 2	729.740 4	152.632 0
归一化均方误差	R	0.725 1	1.185 5	1.354 6	1.023 0	0.233 4	0.022 1
	G	0.274 4	0.846 1	0.319 4	0.751 7	0.197 2	0.057 1
	B	0.216 3	0.672 1	0.125 7	0.498 9	0.229 1	0.093 2
	均值	0.405 2	0.901 3	0.599 9	0.757 9	0.219 9	0.057 5
信噪比	R	6.681 2	5.643 1	5.368 6	5.926 3	9.317 8	16.673 1
	G	8.736 7	6.310 1	8.610 6	6.477 4	8.910 6	12.724 9
	B	8.347 4	6.731 8	10.351 7	7.176 2	7.500 8	10.746 5
	均值	7.921 8	6.228 3	8.110 3	6.526 6	8.576 4	13.381 5
峰值信噪比	R	12.451 8	10.316 5	9.737 5	10.956 8	17.374 4	27.608 3
	G	19.511 4	14.621 3	18.852 6	15.134 7	20.947 4	26.327 7
	B	21.603 2	16.678 3	23.959 2	17.972 7	21.353 3	25.260 7
	均值	17.855 5	13.872 0	17.516 4	14.688 1	19.891 7	26.398 9

(I) 本文方法采用的 FDCT 方法继承了 wavelet 多分辨率、多方向、各向异性子带特征,同时 curvelet 变换以“线”或“面”为影像基本组成单位的处理方法,克服了传统 wavelet 变换以“点”为基本组成单元的处理方法所造成的曲线奇异性,对于保留原始影像更多的细节、突出影像的目标和边缘纹理特征具有更好的效果。

(II) 本文方法采用不同融合策略分级、局部处理,在光谱保持度与传统方法相当,影像清晰度方面远优于传统融合方法,在结构相似度和综合质量的提高方面优势明显,同时能够有效地消除噪声的影响。该方法的这些优势可拓展 TH-1 影像在地理测图、地质找矿等方面的应用。

参考文献(References)

- [1] Zhu Qian, Li Xia, Liu Lingling. Image fusion quality assessment of multisource remote sensing for TH-1 PAN [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(5):363-368.
朱倩,李霞,刘玲玲. 基于 TH-1 卫星全色影像的多源遥感数据融合评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2013,43(5):363-368.
- [2] Starck J L, Murtagh F, Candès E J, et al. Gray and

color image contrast enhancement by the curvelet transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(6): 706-717.

- [3] Candes E, Demanet L, Donoho D, et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. Multiscale Modeling & Simulation, 2006, 5(3): 861-899.
- [4] Zhu Qian, Li Xia, Li Shaofeng. Accuracy assessment of TH-1 satellite image geometric correction using rational function model and polynomial mode [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(2): 110-114.
朱倩,李霞,李少峰. 基于有理函数模型和多项式模型的天绘一号影像几何校正精度评估[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(2): 110-114.
- [5] Zhang Z, Blum R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[J]. Proceedings of the IEEE, 1999,87(8): 1 315-1 326.
- [6] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(1): 600-613.
- [7] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.