

# 一种基于残差的遥感图像融合新方法

葛志荣<sup>1)</sup> 王斌<sup>1,2)</sup> 张立明<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(复旦大学电子工程系,上海 200433) <sup>2)</sup>(复旦大学波散射和遥感信息教育部重点实验室,上海 200433)

**摘要** 针对遥感图像融合问题,提出了一种基于残差的遥感图像融合新方法。该方法借助于主成分分析(principal component analysis, PCA),通过对多光谱图像的残差图像和全色图像的残差图像进行融合来恢复出多光谱图像的高分辨率残差图像,以实现多光谱图像和全色图像的融合。实验结果的主观视觉效果和客观统计参数分析都表明,新方法不仅较大地增强了融合图像的空间细节表现能力,而且很好地保留了多光谱图像的光谱信息,其性能优于现有的 HIS(hue-intensity-saturation)变换融合方法、PCA 融合方法和小波变换(wavelet transform, WT)融合方法。

**关键词** 图像融合 主成分分析 高分辨率残差 低分辨率残差

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)01-0135-06

## A New Scheme for Fusion of Remote Sensing Images Based on Residual Error

GE Zhi-rong<sup>1)</sup>, WANG Bin<sup>1,2)</sup>, ZHANG Li-ming<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Electronics Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

<sup>2)</sup>(The Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information(Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** For the problem of remote sensing image fusion, we propose a new scheme based on residual error in this paper. This scheme restores the high-resolution residual errors for multispectral images by fusing the high-resolution residual error extracted from panchromatic image and the low-resolution residual errors extracted from multispectral images based on principal component analysis(PCA). The assessment of experimental results from subjective visual effect and objective statistical analysis indicates that the proposed scheme has better performance in preserving the spectral characteristics of the multispectral images, while improving the spatial resolution, than the conventional image fusion methods such as the methods based on HIS (hue-intensity-saturation) transform, PCA, and wavelet transform(WT).

**Keywords** image fusion, principal component analysis (PCA), high-resolution residual error, low-resolution residual error

## 1 引言

所谓遥感图像融合就是将不同类型的遥感图像数据进行空间配准后,采用一定方法将各种遥感图像的优点结合起来产生新图像的技术。例如,通常人们希望将多光谱图像和全色图像进行融合,使融

合后的多光谱图像具有较高的空间细节表现能力,同时保持多光谱图像的光谱特性,以便获得对地表景物更全面、清晰的描述,以提高遥感图像的判读与分析精度。

遥感图像的融合方法目前主要有 HIS(hue-intensity-saturation)变换融合方法<sup>[1,2]</sup>、PCA(principal component analysis)融合方法<sup>[3,4]</sup>和小波

基金项目:国家自然科学基金项目(60672116,30370392);国家重点基础研究项目(2001CB309400);航天支撑技术基金项目(2004-1.3-03);上海市自然科学基金项目(04ZR14018)

收稿日期:2005-05-13;改回日期:2005-11-01

第一作者简介:葛志荣(1982~),男。2003年获复旦大学学士学位,现为复旦大学硕士研究生。主要从事图像处理方面的研究。

E-mail: 032021034@fudan.edu.cn

变换融合方法<sup>[5-7]</sup>等,但这些方法各自有以下主要缺点<sup>[9]</sup>:

HIS 变换融合方法在图像处理和领域分析中已成为一个标准方法,由于它是直接采用全色图像替换多光谱图像的亮度分量,从而在增强多光谱图像的空间细节表现能力的同时,也带来了较大的光谱失真;PCA 融合方法适用于多个波段的图像,由于它是直接采用全色图像替换多光谱图像的第一主成分,因此在增强了融合图像的空间细节表现能力的同时,也使得光谱分辨率受到很大的影响。这两种“成分替换”方法的共同缺点在于,在使多光谱图像的空间细节表现能力增强的同时,也带来了较大的光谱失真<sup>[1-4]</sup>。

小波变换融合方法,由于直接舍弃了全色图像的低频分量,因此容易出现分块效应<sup>[7]</sup>。同时,小波变换层数的大小也对融合效果产生很大的影响。如果小波变换分解阶数选得较低,其虽然光谱特性保留较好,但增强后的多光谱图像的空间细节表现能力较差,且容易出现地物纹理模糊;若小波变换层数选得较高,虽然增强后的多光谱图像的空间细节表现能力较好,但光谱特性保留较差<sup>[5-7]</sup>。

针对以上问题,本文提出了一种基于残差的遥感图像融合新方法。新方法的特点在于使用了残差抽取算法来获得图像的残差图像,并通过主成分分析融合多光谱图像的残差图像和全色图像的残差图像来恢复出多光谱图像的高分辨率残差图像。实验结果表明,该新方法既使融合后的多光谱图像具有较高的空间细节表现能力,又尽可能多地保持了原多光谱图像的光谱信息。

## 2 基于残差的遥感图像融合方案

传统的 PCA 融合算法是首先直接抽取多光谱图像的主成分,然后用高分辨率全色图像和低分辨率多光谱图像的第一主成分进行直方图匹配后替换第一主成分,最后经过 PCA 的反变换得到融合图像。由于全色图像和多光谱图像的光谱信息存在一定的差异,因此 PCA 融合方法的主要缺点是导致融合后的多光谱图像原有的光谱信息遭到较严重破坏。

本文针对以上问题,提出了一种基于残差的新的图像融合方法,由于该新方法是在图像残差的层次上进行 PCA 的融合,所以利用主成分分析方法对

多光谱图像的残差图像与全色图像的残差图像进行融合,可以有效地降低融合后多光谱图像的光谱扭曲程度。本文提出的基于残差的遥感图像融合方案如图 1 所示。

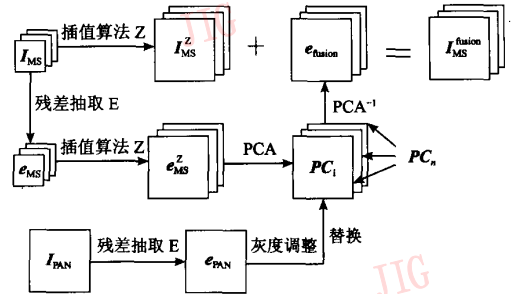


图 1 基于残差的遥感图像融合方案

Fig. 1 Fusion scheme based on residual error

### 2.1 残差的抽取

残差的抽取算法 E 如图 2 所示,即首先通过图像插值算法 Z 获得其插值图像  $I_{MS}$  (下角 MS 代表 multi-spectrum),然后通过低通滤波和降采样过程 L 来获得原多光谱图像的低分辨率图像估计  $I_{MS}^{low}$ ,最后用原多光谱图像  $I_{MS}$  与低分辨率多光谱图像  $I_{MS}^{low}$  相减来得到多光谱图像的残差图像  $e_{MS}$ 。

对于全色图像,也可以采用同样的残差抽取算法 E 去获取全色图像的残差图像  $e_{PAN}$ 。为了将多光谱图像的残差图像  $e_{MS}$  放大到与全色图像的残差图像  $e_{PAN}$  一样大,本文利用上述的图像插值算法 Z 来放大多光谱图像的残差图像(如下式所示):

$$e_{MS}^Z = Z(e_{MS}) \quad (1)$$

由于残差抽取算法能够把图像的空间信息和光谱信息分离,所以得到的残差图像主要包含所分析图像的空间信息,对于残差图像的处理一般不会改变原图像中的光谱信息。由于全色图像的残差图像包含了多光谱图像的残差图像所没有的空间信息,因此用全色图像的残差图像去增强多光谱图像的残差图像,既能增强多光谱图像的空间信息,又不会改变多光谱图像的光谱信息。

另外,值得指出的是,本文采用 PCA 融合全色图像和多光谱图像的残差图像,这样做既可提高融合后多光谱图像的空间分辨率,又可使算法具有较好的鲁棒性。

### 2.2 残差的融合

经过插值后得到的残差图像  $e_{MS}^Z$  需要增强空间细节信息,本文采用主成分分析的方法在多光谱图

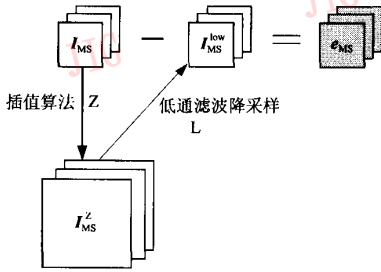


图 2 残差的抽取

Fig. 2 Extraction of residual error

像的残差图像中融入全色图像的残差图像的空间细节信息。

应用主成分分析方法可以计算出多光谱图像的残差图像  $e_{MS}^z$  的各个主成分图像  $PC_n, n=1, 2, 3$ 。其中,  $PC_1$  表示  $e_{MS}^z$  的第一主成分, 其有最大的方差, 它包含着  $e_{MS}^z$  中的主要的空间信息, 而其他主成分图像  $PC_2$  和  $PC_3$  虽有较小的方差, 但它们仍携带了包括多光谱图像残留在其残差图像中的光谱信息。本文用全色图像的残差图像  $e_{PAN}$  经过灰度调整后来替换第一主成分图像  $PC_1$ , 并以此来增强残差图像  $e_{MS}^z$  的空间细节。由于全色图像的残差图像  $e_{PAN}$  与第一主成分图像  $PC_1$  的均值均为零, 因此其灰度调整可按下式进行

$$z(i, j) = x(i, j) \times \sigma_y / \sigma_x \quad (2)$$

其中,  $x(i, j)$  表示图像  $e_{PAN}$  在点  $(i, j)$  处的灰度值,  $\sigma_x^2$  和  $\sigma_y^2$  分别表示图像  $e_{PAN}$  和第一主成分图像  $PC_1$  的方差,  $z(i, j)$  是替换后的第一主成分图像  $PC_1^{new}$  在点  $(i, j)$  处的灰度值。通过对替换后的第一主成分图像  $PC_1^{new}$  和其他主成分图像  $PC_2, PC_3$  进行主成分分析的逆变换即可以获得融合后的高分辨率残差图像  $e_{fusion}$ 。

最后, 把多光谱图像的插值图像  $I_{MS}^z$  和融合后的多光谱图像的高分辨率残差图像  $e_{fusion}$  相叠加即可得到多光谱图像的高分辨率图像的融合图像

$$I_{MS}^{fusion} = I_{MS}^z + e_{fusion} \quad (3)$$

在以上的图像融合方法中, 本文通过多光谱图像的插值图像  $I_{MS}^z$ , 使得融合后的图像保留了原多光谱图像中主要的光谱信息。更重要的是, 在高分辨率融合图像  $e_{fusion}$  的恢复过程中, 本文采用了主成分分析的方法来融入具有较高空间分辨率全色图像的残差图像  $e_{PAN}$  的空间细节信息, 这样做的结果不但使融合结果图像  $I_{MS}^{fusion}$  具有高的空间分辨率, 而且尽

可能多地保留了原多光谱图像中的光谱信息。也就是使融合结果既具有高的空间分辨率, 同时又尽可能多地保留了原多光谱图像中的光谱信息, 这是本文图像融合方法的重要特点。

### 3 实验结果及评价

#### 3.1 崇明地区的 Landsat 遥感图像融合实验

将 Landsat-7 ETM+ 传感器在 2000 年 6 月 14 日拍摄到的上海崇明地区的多光谱图像和全色图像作为实验数据 (如图 3(a) 和 (b) 所示), 采用本文算法进行了融合实验。实验中将多光谱图像的 321 波段分别作为 RGB 通道来合成彩色图像, 它的空间分辨率是 30m, 全色图像的空间分辨率是 15m。

同时利用本文所提议的方法与标准的 HIS、PCA 和 HIS 结合小波变换 (wavelet transform, WT) 方法 (HIS + WT) 以及 PCA 结合小波变换方法 (PCA + WT) 对上述数据进行融合处理, 分别获得各种算法的融合图像 (如图 3(c) ~ (g) 所示)。这里小波变换方法采用 3 阶 Daubechies 小波基, 小波分解的层数为 3 层。

以下从光谱信息保真度和高分辨率信息的融入度两方面对这些融合图像进行视觉效果分析和基于统计参数的定量评价。

从视觉效果上分析, 原始多光谱图像中右上角的河流是白色的, 但是在 HIS、PCA 的融合图像中河流的色彩是接近黑色的, 这说明在融合过程中存在着光谱信息的失真, 而在本文所提议方法的融合图像中, 则所有的目标物体的色彩都和原始多光谱图像保持一致。另外, 在图 3(c) 的融合图像的左下角可以清晰地观察到纵横交错的栅格和跑道状的星簇图案, 这说明所提议的方法能够较好地融入全色图像的高分辨率信息。

本文采用以下两类统计参数来定量评价融合方法的性能: 第 1 类统计参数反映了遥感图像的空间分辨率信息, 其定义如下:

(1) 方差

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i, j) - \bar{f})^2 \quad (4)$$

其中,  $f(i, j)$  是图像的各像素灰度值,  $\bar{f}$  是图像的像素均值。

(2) 信息熵

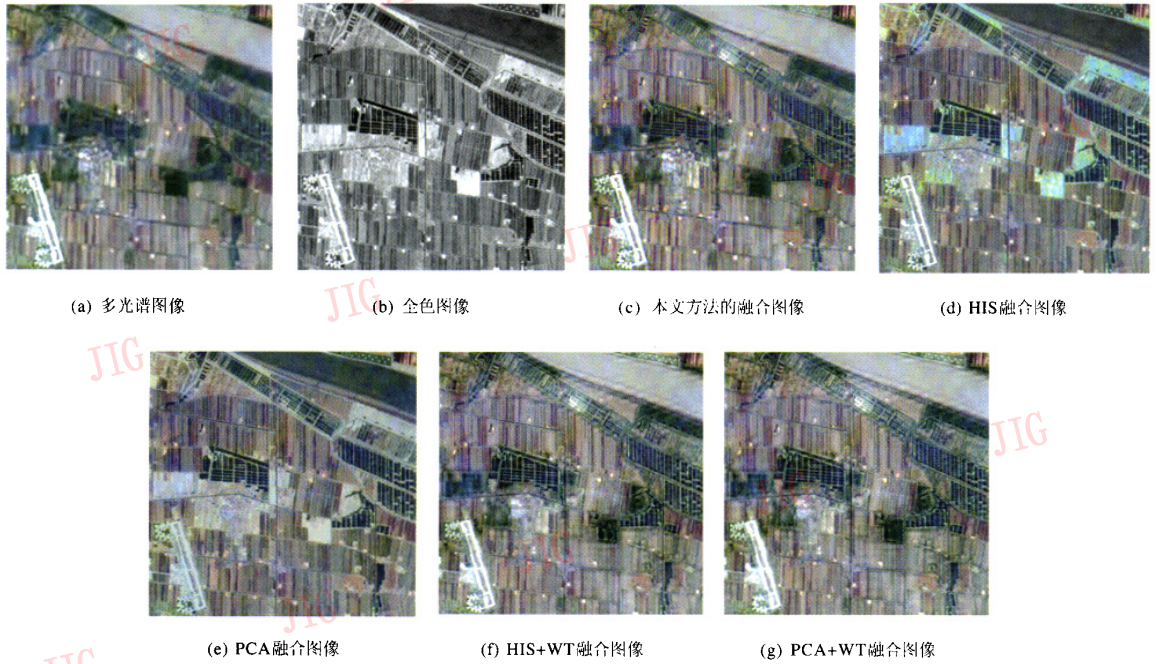


图 3 上海崇明地区的 Landsat 多光谱图像和全色图像的融合  
Fig. 3 Fusion of Landsat MS and PAN images of Chongming, Shanghai

$$H = - \sum_{i=1}^L p_i \times \log p_i \quad (5)$$

对于  $[0, L]$  的灰度范围,  $p_i$  为灰度值等于  $i$  的像素数与图像总像素数之比。

(3) 清晰度

$$g = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\Delta I_x^2(i, j) + \Delta I_y^2(i, j)} \quad (6)$$

其中,  $\Delta I_x$  与  $\Delta I_y$  分别为图像  $I$  在  $x$  与  $y$  方向上的差分。

计算得到的源图像和融合图像在各波段上的方差、信息熵和清晰度如表 1 所示。通常,较大的方差、信息熵和清晰度说明图像的灰度级分布比较均衡,图像携带的高分辨率信息比较丰富。本文方法的融合图像中,各波段的方差、信息熵和清晰度都比多光谱图像要大,达到了与其他融合方法相当的性能。上述分析说明,新方法在融合过程中能够较好地融入高分辨率的空间信息。

表 1 上海崇明地区融合图像的的方差、信息熵和清晰度

Tab. 1 Deviation, entropy and definition of fused images at Chongming, Shanghai

| 融合方法     | 方差    |       |       | 信息熵  |      |      | 清晰度   |       |       |
|----------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
|          | R     | G     | B     | R    | G    | B    | R     | G     | B     |
| 多光谱图像    | 39.98 | 35.46 | 35.82 | 5.02 | 4.83 | 4.79 | 5.70  | 4.53  | 4.36  |
| 本文方法     | 44.37 | 39.31 | 39.46 | 5.13 | 5.01 | 5.03 | 12.77 | 10.87 | 10.69 |
| HIS      | 35.62 | 40.62 | 37.79 | 4.92 | 5.01 | 4.94 | 9.92  | 10.19 | 10.19 |
| PCA      | 37.18 | 34.58 | 32.44 | 5.00 | 4.92 | 4.86 | 10.01 | 9.10  | 9.05  |
| HIS + WT | 41.71 | 38.05 | 38.24 | 5.07 | 5.00 | 5.01 | 10.08 | 9.87  | 9.87  |
| PCA + WT | 42.32 | 38.07 | 38.24 | 5.10 | 5.01 | 5.02 | 10.66 | 9.63  | 9.59  |

第 2 类统计参数反映了源图像和融合图像之间光谱信息的保持程度,其定义如下:

(1) 扭曲程度

$$D = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |f(i, j) - g(i, j)| \quad (7)$$

(2) 偏差指数

$$D_{\text{index}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|f(i, j) - g(i, j)|}{f(i, j)} \quad (8)$$

(3) 相关系数

$$C(f, g) = \frac{\sum [(f(i, j) - \bar{f}) \times (g(i, j) - \bar{g})]}{\sqrt{\sum [(f(i, j) - \bar{f})^2] \times \sum [(g(i, j) - \bar{g})^2]}} \quad (9)$$

其中,  $f(i, j)$  和  $g(i, j)$  分别为源图像和融合图像的灰度值,  $\bar{f}$  和  $\bar{g}$  分别为两幅图像的灰度均值。

表 2 上海崇明地区各种融合方法融合图像的扭曲程度、偏差指数和相关系数

Tab. 2 Distortion, departure and correlation coefficient of fused images at Chongming, Shanghai

| 融合方法     | 扭曲程度  |       |       | 偏差指数 |      |      | 相关系数  |       |       |
|----------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
|          | R     | G     | B     | R    | G    | B    | R     | G     | B     |
| 本文方法     | 11.64 | 10.42 | 10.07 | 0.12 | 0.10 | 0.10 | 0.932 | 0.931 | 0.937 |
| HIS      | 32.68 | 35.90 | 35.35 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.330 | 0.094 | 0.078 |
| PCA      | 37.32 | 33.37 | 33.29 | 0.45 | 0.34 | 0.35 | 0.120 | 0.144 | 0.106 |
| HIS + WT | 13.79 | 13.80 | 13.81 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.897 | 0.873 | 0.874 |
| PCA + WT | 14.93 | 13.36 | 13.33 | 0.16 | 0.13 | 0.13 | 0.881 | 0.881 | 0.883 |

综上所述,本文方法在 Landsat 卫星遥感图像融合中,不仅较大地增强了融合图像的高分辨率信息,而且很好地保留了源图像的光谱信息。

### 3.2 江苏地区的 Landsat 遥感图像融合实验

图 4(a) 和图 4(b) 为 Landsat-7 ETM + 传感器在 2000 年 6 月 14 日拍摄到的江苏某海滨区域的多光

谱图像和全色图像。其中多光谱图像的空间分辨率是 30m, 全色图像的空间分辨率是 15m。利用本文方法与 HIS、PCA 和 HIS + WT 以及 PCA + WT 方法对上述图像进行融合处理,其分别获得的融合图像如图 4(c)~图 4(g) 所示。从视觉效果上可以明显观察到用 HIS、PCA 融合的图像在右下角的水体边

谱图像和全色图像。其中多光谱图像的空间分辨率是 30m, 全色图像的空间分辨率是 15m。利用本文方法与 HIS、PCA 和 HIS + WT 以及 PCA + WT 方法对上述图像进行融合处理,其分别获得的融合图像如图 4(c)~图 4(g) 所示。从视觉效果上可以明显观察到用 HIS、PCA 融合的图像在右下角的水体边

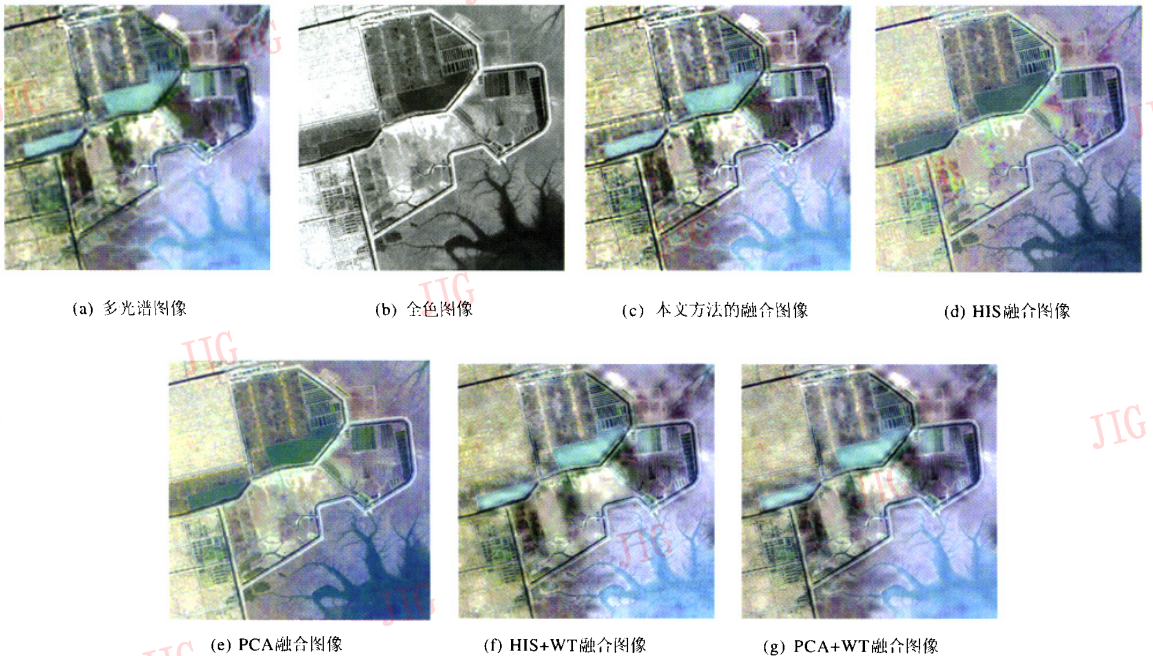


图 4 江苏海滨地区的 Landsat 多光谱图像和全色图像的融合

Fig. 4 Fusion of Landsat MS and PAN images at seaside of Jiangsu, Province

缘部分出现了光谱失真的现象,而本文方法融合的图像则不仅保持了多光谱图像的光谱信息,而且较好地融入了全色图像的空间信息。

表 3 和表 4 的统计参数也说明了用本文方法融合的图像有较大的方差、信息熵和清晰度以及较小的扭曲程度、偏差指数以及较大的相关系数。

表 3 江苏海滨地区各种融合方法融合图像的的方差、信息熵和清晰度

Tab. 3 Deviation, entropy and definition of fused images at seaside of Jiangsu, Province

| 融合方法     | 方差    |       |       | 信息熵  |      |      | 清晰度   |       |      |
|----------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
|          | R     | G     | B     | R    | G    | B    | R     | G     | B    |
| 多光谱图像    | 43.62 | 41.35 | 45.40 | 5.14 | 4.89 | 4.82 | 6.32  | 5.30  | 4.65 |
| 本文方法     | 50.67 | 47.29 | 49.88 | 5.25 | 5.20 | 5.27 | 12.01 | 10.46 | 9.53 |
| HIS      | 49.52 | 42.63 | 46.31 | 5.26 | 5.12 | 4.82 | 9.20  | 9.14  | 9.10 |
| PCA      | 54.53 | 41.93 | 50.67 | 5.29 | 4.99 | 4.82 | 8.34  | 7.88  | 7.81 |
| HIS + WT | 43.53 | 41.57 | 45.95 | 5.14 | 5.08 | 5.21 | 9.32  | 8.81  | 8.65 |
| PCA + WT | 43.08 | 41.25 | 45.64 | 5.15 | 5.08 | 5.20 | 8.46  | 8.06  | 7.99 |

表 4 江苏海滨地区各种融合方法融合图像的扭曲程度、偏差指数和相关系数

Tab. 4 Distortion, departure and correlation coefficient of fused images at seaside of Jiangsu, Province

| 融合方法     | 扭曲程度  |       |       | 偏差指数 |      |      | 相关系数  |       |       |
|----------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
|          | R     | G     | B     | R    | G    | B    | R     | G     | B     |
| 本文方法     | 12.52 | 11.15 | 10.16 | 0.12 | 0.10 | 0.09 | 0.937 | 0.939 | 0.956 |
| HIS      | 35.15 | 40.64 | 41.93 | 0.36 | 0.35 | 0.36 | 0.585 | 0.242 | 0.110 |
| PCA      | 39.31 | 40.76 | 41.99 | 0.42 | 0.35 | 0.37 | 0.545 | 0.293 | 0.144 |
| HIS + WT | 14.87 | 14.96 | 14.99 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.886 | 0.872 | 0.894 |
| PCA + WT | 13.57 | 14.11 | 14.55 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.900 | 0.881 | 0.896 |

## 4 结 论

针对遥感图像融合问题,本文提出了一种基于残差的遥感图像融合新方法。该方法在较大地增强融合图像的空间细节表现能力的同时,还很好地保留了原多光谱图像的光谱信息,并且具有物理意义明确、实现结构简单、融合效果好的优点。在不同地区的 Landsat 卫星遥感图像上的实验都表明,本文方法的性能优于目前为止所广泛采用的基于 HIS 变换的融合方法、基于 PCA 的融合方法、基于 HIS 变换和小波变换相结合以及基于 PCA 变换和小波变换相结合的遥感图像融合方法。因此新方法可为改善遥感图像的目视判读精度、提高信息清晰度和可靠性上提供新的有效的技术支持。

### 参考文献 (References)

- 1 Carper W J, Lillesand T M, Kiefer R W. The use of the intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(5):459~467.
- 2 Welch R, Ehlers M. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, 53(3):301~303.
- 3 Chavez P S, Sides 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.
- 4 Shettigara V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58(5):561~567.
- 5 Nunez J, Otazu X, Fors O, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3):1204~1211.
- 6 Gonzalez A M, Saleta J L, Catalan R G, et al. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(6):1291~1299.
- 7 Li Jun, Zhou Yue-qin, Li De-ren. Fusion of high resolution panchromatic and multispectral images by using wavelet transform [J]. Journal of Remote Sensing, 1999, 3(2):116~122. [李军, 周月琴, 李德仁. 小波变换用于高分辨率全色影像与多光谱影像的融合研究[J]. 遥感学报, 1999, 3(2):116~122.]
- 8 Li Bi-cheng, Wei Jun, Peng Tian-qiang. Objective analysis and evaluation of remote sensing image fusion effect [J]. Computer Engineering & Science, 2004, 26(1):42~46. [李炳程, 魏俊, 彭天强. 遥感图像融合效果的客观分析和评价[J]. 计算机工程与科学, 2004, 26(1):42~46.]
- 9 Wang Zhi-jun, Ziou D, Armenakis C, et al. A comparative analysis of image fusion methods [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(6):1391~1402.