

基于多光谱图像超分辨率处理的遥感图像融合

杨超 杨斌 黄国玉*

南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421001

摘要 传统遥感图像融合方法没有充分利用低分辨率多光谱图像本身的空间信息。针对这一问题,提出了一种基于低分辨率多光谱图像超分辨率处理的遥感图像融合方法。通过对低分辨率多光谱图像进行基于稀疏表示的图像超分辨率处理,在保持其光谱信息的基础上增强其空间信息;利用静态小波变换对增强的多光谱图像的亮度分量 Y 和全色图像进行融合;由YUV逆变换得到融合多光谱图像。在真实遥感图像上进行的实验结果表明该算法能有效提高融合图像的空间细节信息,同时保留了光谱信息,对比实验验证了该方法的优越性。

关键词 遥感; 图像融合; 图像超分辨; YUV变换; 静态小波变换

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.021001

Remote Sensing Image Fusion Based on Multispectral Image Super-Resolution

Yang Chao Yang Bin Huang Guoyu

College of Electric Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China

Abstract The traditional remote sensing image fusion methods is not make good use of spatial information of the low-resolution multispectral images. To solve this problem, a novel remote sensing image fusion method based on low-resolution multispectral image super-resolution processing is proposed. The low-resolution multispectral image is processed by super-resolution based on sparse representation, which enhances spatial information while maintaining the spectral information. The intensity component Y of the enhanced multispectral image and the panchromatic image are fused using the stationary wavelet transform. The fused multispectral image is obtained via inverse YUV transform. The experimental results carried out on real remote sensing images show that the proposed algorithm is able to improve spatial details of the fused image effectively while maintaining the spectral information. The effectiveness of the proposed method is also verified by the comparable experiments.

Key words remote sensing; image fusion; image super-resolution; YUV transform; stationary wavelet transform

OCIS codes 280.4991; 100.2980; 350.2660

1 引言

由于信号传输带宽及成像传感器存储的限制,遥感卫星通常只能获取高分辨率的全色图像与低分辨率的多光谱图像。全色图像的空间分辨率高,空间细节信息丰富,但光谱信息较少;而多光谱图像具有丰富的光谱信息,有利于地物识别,但空间分辨率低。遥感图像融合通过对高分辨率全色图像与低分辨率多光谱图像的结合,生成高分辨率的多光谱图像,从而为卫星图像的可视化管理以及应用处理提供高质量的图像数据^[1-4]。目前遥感图像融合已经成为信息融合领域一重要分支,受到国内外学者广泛的关注^[5-6]。

针对遥感图像融合问题,世界各国学者已提出了很多算法,其中最常用的方法有变量替换法、多分辨率

收稿日期: 2015-06-10; 收到修改稿日期: 2015-09-11; 网络出版日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(61102108)、湖南省教育科学研究基金(11C1101, YB2013B039, 12A115)、南华大学青年英才支持计划、南华大学重点学科建设工程(NHXX04)

作者简介: 杨超(1990—),男,硕士研究生,主要从事图像融合方面的研究。E-mail: ychao0906@163.com

导师简介: 杨斌(1980—),男,博士,副教授,主要从事图像处理、模式识别等方面的研究。

E-mail: yangbin01420@163.com

*通信联系人。E-mail: guoyu162@163.com

分析法和高通滤波法。这些方法主要是从两个方面进行改进:1)如何更有效地从全色图像中提取高分辨率的空间细节信息;2)如何将提取到的空间细节信息注入到低分辨率多光谱图像中而不产生光谱扭曲。变量替换法把低分辨率的多光谱图像变换到一个新的图像表达空间,用全色图像替换多光谱图像的结构分量,通过空间逆变换得到高分辨率多光谱图像。常用的变换方法包括IHS变换^[7-8],主成份分析(PCA)^[9]和GS变换^[10]等。该类方法简单方便,能有效地提高融合图像的空间分辨率,但对全色图像与多光谱图像的结构分量存在差别时,会在融合图像中产生较严重的光谱扭曲。多分辨率分析法和高通滤波法^[11]将全色图像分解成高频分量和低频分量,并将高频分量注入到低分辨率多光谱图像中,提高其空间分辨率。常用的多分辨率分析方法包括小波变换^[12],à trous小波变换(ATWT)^[13],曲波变换^[14]和支持值变换^[15]等。这些方法能够很好地保留原始图像的光谱信息,但是高频分量注入到多光谱图像时,如果参数设置不当很容易产生细节变形,使图像看起来不够自然。对此,为充分利用这两类方法各自的优点,很多学者提出了将变量替换和多分辨率分析相结合的方法,例如基于IHS或YUV变换与小波变换结合的融合方法,其中包括不可分小波与IHS结合方法^[16]。该类算法利用多分辨率分解提取全色图像的高频信息,将其注入到多光谱图像的结构分量中,通过颜色空间逆变换获得高分辨多光谱图像^[17-19]。

传统的融合算法并没有充分利用低分辨率多光谱图像的空间信息。事实上,低分辨率多光谱图像的空间信息也是可以充分利用的,但是在利用插值法对多光谱图像进行放大处理后,并不能保持很好的空间细节信息。对此,本文提出了一种基于低分辨率多光谱图像超分辨率处理的遥感图像融合方法。通过对低分辨率多光谱图像进行基于稀疏表示图像超分辨率^[20]处理,在保持光谱信息的基础上增强其空间信息;将增强的多光谱图像进行YUV变换,并利用静态小波变换^[21](SWT)对多光谱图像的亮度分量和全色图像进行融合;通过YUV逆变换得到高分辨率多光谱图像。这种融合策略不仅在一定程度上减少因亮度分量与全色图像的差异所造成的光谱失真,而且可以克服因直接舍弃全色图像的低频分量而对空间信息的包含能力的影响。

2 多光谱图像超分辨率

大多数遥感图像融合方法往往采用双线性插值或者双三次插值法对低分辨率多光谱图像进行放大,从而使其图像尺寸与全色图像尺寸相适应,便于后续融合。然而这种简单的放大处理并没有增加多光谱图像的真实分辨率,图像看起来比较模糊。研究发现在低分辨率图像和其对应的高分辨率图像之间存在同现先验^[22-23],因而可以利用低分辨率多光谱图像本身来提高其分辨率,从而充分利用原始多光谱图像的空间信息。对此,利用稀疏表示实现多光谱图像的超分辨率,在保持低分辨率多光谱图像光谱信息的基础上增强其空间细节信息。将低分辨率多光谱图像从RGB空间转换到YUV色彩空间,实现图像的亮度信息与光谱信息的分离,避免超分辨率造成色彩失真;对亮度分量采用基于稀疏表示的图像超分辨率处理^[20],提高图像的清晰度,并对色彩分量采用双线性插值法进行放大;再将图像转换到RGB空间,获得高分辨率多光谱图像。

设低分辨率多光谱图像的亮度分量为 Y ,以滑块的形式从左到右,从上到下的顺序对图像进行分块,其中每一个图像块为 $y \in R^{\sqrt{N} \times \sqrt{N}}$,超分辨率算法的目的是恢复其高分辨率亮度分量 X ,其中每一个图像块为 $x \in R^{q\sqrt{N} \times q\sqrt{N}}$,其中 q 为放大倍数。本文采用基于稀疏表示的图像超分辨率方法来提高多光谱图像的分辨率。先采用联合字典学习算法^[20]训练出高、低分辨率字典 $D_h \in R^{N \times K}$ 和 $D_l \in R^{q^2 N \times K}$ 。然后,假设通过超分辨率重建与先前得到的高分辨率邻近块是一致的,利用稀疏表示理论建立高、低分辨率图像块间的关系,即

$$\min \|\alpha\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|D_l \alpha - y\|_2^2 \leq \varepsilon_1, \|PD_h \alpha - w\|_2^2 \leq \varepsilon_2, \quad (1)$$

式中 α 为稀疏表示系数,矩阵 P 是用于从先前已重建的高分辨率图像中提取与当前目标块重合的部分, w 表示包含先前已重建的高分辨率图像重叠部分的值, ε_1 和 ε_2 为逼近误差。将(1)式整理可得

$$\min \lambda \|\alpha\|_1 + \|\tilde{D}\alpha - \tilde{y}\|_2^2, \quad (2)$$

式中 $\tilde{D} = \begin{bmatrix} D_l \\ PD_h \end{bmatrix}$, $\tilde{y} = \begin{bmatrix} y \\ w \end{bmatrix}$ 。依次对每个低分辨率特征块 y 求解关于字典 D_l 的稀疏表示 α ,即求解以下最小化问题:

$$\hat{\alpha} = \arg \min \|\alpha\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \|y - D_l \alpha\|_2^2 \leq \varepsilon, \quad (3)$$

由于每对高、低分辨率图像块共有同一个稀疏表示系数,则求出系数 $\hat{\alpha}$ 后,通过 $x = D_l \hat{\alpha}$ 得到对应的高分辨

率图像块 x 。通过拼接所有的高分辨率图像块得到高分辨率亮度分量 X 。此外,将多光谱图像的色彩分量采用双线性插值法进行放大,结合其高分辨率亮度分量,由颜色空间逆变换获得高分辨率多光谱图像。

低分辨率多光谱图像放大的实例如图 1 所示。放大倍数设置为 2,源图像图 1(a) 的尺寸为 128 pixel×128 pixel,则图 1(b)和图 1(c)分别是采用双线性插值法和基于稀疏表示的图像超分辨率算法对低分辨率多光谱图像进行放大处理得到的结果,图像尺寸都为 256 pixel×256 pixel。由图 1(b)可以看出,整个图像过于平滑,图中的公路、植被、建筑物等空间细节信息显得较模糊;而图 1(c)中的空间细节信息显得更加清晰,整个图像看起来比较自然。因此,对比双线性插值法结果,说明基于稀疏表示图像超分辨率结果增加了多光谱图像的空间信息。



图 1 源图像和不同方法得到的放大结果。(a) 低分辨率图像;(b) 双线性插值法结果;(c) 超分辨率结果

Fig.1 Source image and the expanded results using different methods. (a) Low resolution image;
(b) result of bilinear interpolation; (c) result of super resolution

3 本文算法

在基于变量替换和多分辨率分析相结合遥感图像融合框架下,验证基于多光谱图像超分辨率融合思想的可行性。采用 YUV 变换实现多光谱图像光谱信息与结构信息的分离,采用基于 SWT 方法实现亮度分量与全色图像的融合,充分利用了 SWT 的平移不变性及对图像细节分量的表达能力^[24]。图 2 为基于多光谱图像超分辨率的遥感图像融合算法流程图。假设全色图像与多光谱图像已配准,算法具体步骤如下:

- 1) 利用第 2 章基于稀疏表示的图像超分辨率算法对低分辨率多光谱图像进行超分辨率处理,增强多光谱图像的空间结构信息;
- 2) 选取增强多光谱图像的亮度分量 Y ,将全色图像与亮度分量 Y 进行直方图匹配,使它们保持相近的均值及方差,以减少光谱扭曲;
- 3) 分别对亮度分量 Y 和全色图像进行三层静态小波分解,得到它们的低频分量 Y_A 和 Pan_A ,以及水平、垂直和对角线方向上的高频分量 Y_H, Y_V, Y_D 和 Pan_H, Pan_V, Pan_D ;
- 4) 选择低频分量 Y_A 作为融合后的低频分量 F_A ,高频分量 Pan_H, Pan_V, Pan_D 作为融合后的水平、垂直、对角线方向的高频分量 F_H, F_V, F_D ;
- 5) 对融合后的低频和高频分量进行静态小波逆变换,得到融合后的亮度分量,结合色彩分量进行 YUV 逆变换,得到融合图像即高分辨率多光谱图像。

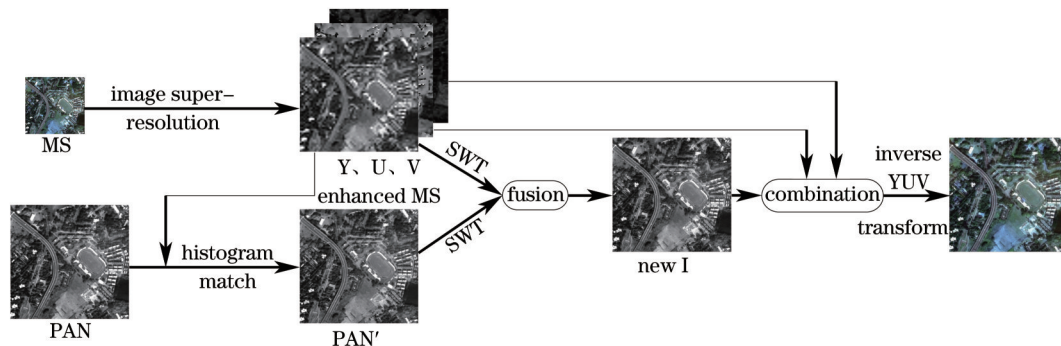


图 2 本文融合算法流程图

Fig.2 Flowchart of the proposed fusion algorithm

4 实验结果与分析

采用四组 Quickbird 卫星在 2002 年 11 月 21 日对印度孙德尔本斯国家公园所采集的多光谱图像和全色图像,利用本文方法进行仿真实验,数据集中包含空间分辨率为 0.7 m 的全色图像和 2.8 m 的多光谱图像。为了能用评价指标进行客观评价,采用低通滤波器和下采样操作对全色图像和多光谱图像进行退化处理,得到空间分辨率为 2.8 m 的全色图像和 11.2 m 的多光谱图像,用退化后的多光谱图像和全色图像进行融合,产生空间分辨率为 2.8 m 的多光谱图像。把真实的空间分辨率为 2.8 m 的多光谱图像作为参考图像,将融合结果与其进行比较来验证算法效果。所用源图像都已经过图像配准等预处理。选择多光谱图像大小为 64 pixel×64 pixel,全色图像大小为 256 pixel×256 pixel。在图像超分辨率算法中,高、低分辨率字典的训练十分重要,从数据库下载 100 张通用的彩色图像作为样本数据,从样本图像中随机选取 100000 个大小为 9 pixel×9 pixel 的图像块,利用联合字典训练算法^[20],训练出大小为 25 pixel×1024 pixel 高分辨率字典和 100 pixel×1024 pixel 低分辨率字典。本文算法在 AMD 2.70 GHz PC 上利用 Matlab R2012a 编程实现。

为了验证本文算法的性能,将其与目前广泛使用的基于 ATWT、SWT、IHS 变换以及 IHS 与 SWT 相结合的遥感图像融合算法进行比较。四种对比方法都是利用双线性插值法分别对多光谱图像的三个彩色通道进行插值放大,采用不同的融合方法将其与全色图像进行融合。其中,ATWT、SWT 采用的小波基都为 db6,分解层数均为 3 层,高、低频系数选择与本文算法一致。

4.1 评价指标

1) 相关系数(CC)

$$R_{CC} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - \bar{I}][F(i,j) - \bar{F}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - \bar{I}]^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(i,j) - \bar{F}]^2}}, \quad (4)$$

式中 \bar{I} 表示多光谱图像的均值, \bar{F} 表示融合图像的均值, i, j 为图像的像元的行列位置。光谱 CC 衡量融合图像与多光谱图像之间的相关程度,其值越大,表明图像的光谱保持能力越好。

2) 空间相关系数(SCC)

$$R_{SCC} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [P(i,j) - \bar{P}][F'(i,j) - \bar{F}']}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [P(i,j) - \bar{P}]^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F'(i,j) - \bar{F}']^2}}, \quad (5)$$

式中 \bar{P} 为经过高通滤波器处理的全色图像的均值, \bar{F}' 表示通过该高通滤波器滤波后的融合图像的均值。SCC 表示融合图像与全色图像在空间细节信息上的相关程度,其值越大,则表明图像空间细节保持越好。采用的高通滤波器为拉普拉斯滤波器。

3) 信息熵(EN)

$$R_{EN} = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \lg p_i, \quad (6)$$

式中 p_i 为图像灰度级 i 的分布概率, L 为图像灰度级总数,一般取为 256。EN 反映图像中所包含信息的丰富程度,其值越大,表明包含的信息越丰富。

4) 平均梯度(AG)

$$R_{AG} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \left[\frac{\Delta_x F(i,j)^2 + \Delta_y F(i,j)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式中 $\Delta_x F(i,j)$ 和 $\Delta_y F(i,j)$ 是 $F(i,j)$ 在 x, y 方向上的一阶差分。AG 不仅可以反映图像的清晰程度,还反映出图像中微小细节反差和纹理变换特征。AG 越大,表明图像的层次越多,也就越清晰。

5) 相对整体维数综合误差(ERGAS)

$$R_{ERGAS} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{R_{RMSE}^2(i)}{M^2(i)} \right)}, \quad (8)$$

式中 h 是全色图像的空间分辨率; l 是多光谱图像的空间分辨率。 N 是融合图像的波段数目, 实验中 $N=3$; $M(i)$ 表示参考图像的第 i 个波段的均值。 $R_{\text{RMSE}}(i)$ 表示源多光谱图像和融合图像第 i 个波段之间的均方误差。 R_{ERGAS} 越小, 表明融合图像的光谱质量越高, 光谱保持能力越强。

4.2 实验结果

图 3~6 分别给出了四组真实遥感图像(例 1~4)以及不同算法的融合结果。在图 3~6 中, IHS+SWT 表示基于 IHS 与 SWT 相结合的方法。从视觉效果可以看出, 各种融合结果中的公路、植被、建筑物等空间细节信息以及图像清晰度与源多光谱图像相比得到明显地提高, 从而在一定程度上增强了空间分辨率。从图 3~6 中 (f) 可以看出 IHS 变换融合结果的空间细节信息比较清晰, 但是在一些颜色较亮的区域, 图 3~6 中 (f) 的主观效果显得较淡, 主要是由于 IHS 变换在亮度分量的替代过程中全色图像与亮度分量之间存在差异从而严重扭曲了光谱特性; 从图 3~6 中 (d)、(e)、(g) 可以看出 ATWT、SWT 以及 IHS+SWT 融合结果的光谱特征失真较小, 空间细节信息比较丰富, 但是整个图像的清晰度并不高; 图 3~6 中 (h) 是本文算法得到的融合结果, 与前 4 种方法相比, 融合图像光谱失真更小, 细节轮廓更加清晰, 视觉效果更好, 更接近参考图像。

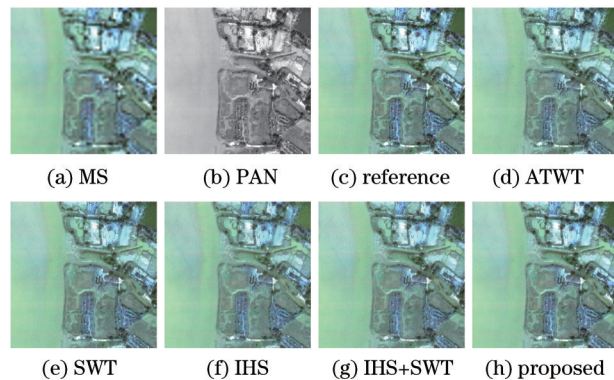


图 3 源图像及不同算法的融合结果

Fig.3 Source images and the fused results with different algorithms

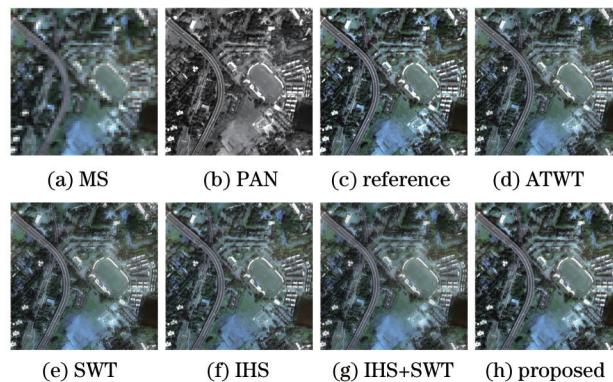


图 4 源图像及不同方法的融合结果

Fig.4 Source images and the fused results with different algorithms

5 种融合算法的客观评价指标如表 1 所示, 其中每个数据为三个通道评价指标的平均值, 并用粗体显示最好的评价结果。从表 1 可以看出, 本文算法得到的融合结果的评价指标都是最优的。IHS 算法的 EN 和光谱 CC 最小, ERGAS 最大, 而且 SCC 和 AG 值也比较小, 说明图像中树木、草地的光谱失真最严重; 基于 SWT 算法的平均梯度和空间相关系数都相对较小, 说明图像的空间细节信息在一定程度上存在损失; 基于 ATWT 算法有较高的 EN 和 AG, 但是光谱 CC 较小并且 ERGAS 较大, 说明融合图像的空间细节信息损失较小, 但是有一定的光谱失真。基于 IHS+SWT 算法具有较大的光谱 CC 和较小的 ERGAS, 而其他指标都较小, 说明图像的光谱信息保留较完整, 但不是很清晰。然而, 从整体上看, 由本文方法所得到融合结果在光谱 CC 和 ERGAS 优于其他四种方法, 说明本文方法能够获得很好的光谱质量, 并且在 SCC、AG 和 EN 等评价指标上也都优于其他方法, 说明该方法能更好地保持源图像的空间细节, 使融合图像的细节轮廓清晰并且所包含的信息最丰富。因此, 本文方法在光谱保真度、空间细节保持程度、图像的清晰度、信息的丰富程度

以及 ERGAS 都优于基于 SWT、ATWT、IHS 以及 IHS+SWT 的遥感图像融合方法,而且能在有效提高融合图像空间细节信息的基础上,很好地保留了光谱信息。

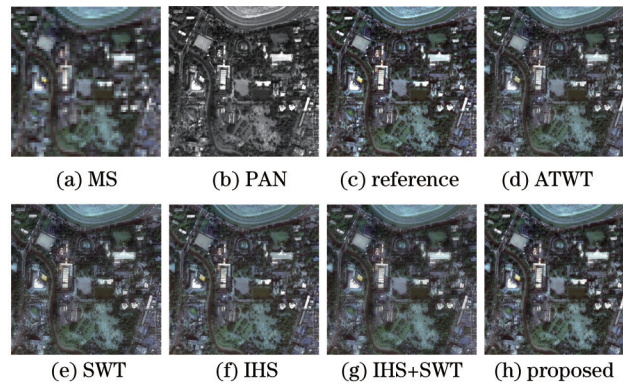


图 5 源图像及不同方法的融合结果

Fig.5 Source images and the fused results with different algorithms

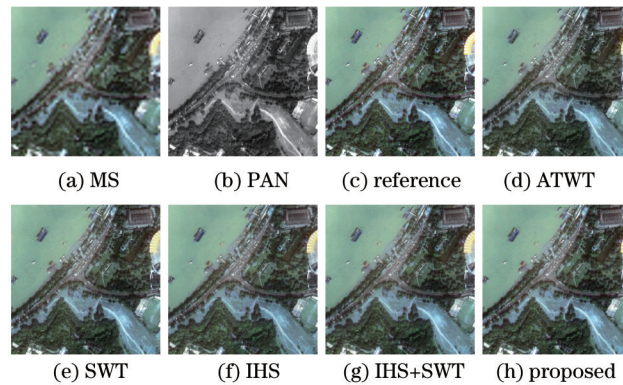


图 6 源图像及不同方法的融合结果

Fig.6 Source images and the fused results with different algorithms

表 1 不同融合算法的客观评价指标

Table 1 Objective evaluation indexes of the different fused algorithms

| Experiment | Index | ATWT | SWT | IHS | IHS+SWT | Proposed |
|------------|-------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Example 1 | EN | 7.1533 | 7.1694 | 7.1003 | 7.1762 | 7.2332 |
| | CC | 0.9789 | 0.9814 | 0.9818 | 0.9842 | 0.9874 |
| | SCC | 0.9700 | 0.9703 | 0.9845 | 0.9843 | 0.9915 |
| | ERGAS | 1.5293 | 1.4413 | 1.6444 | 1.3721 | 1.1780 |
| | AG | 7.9591 | 7.9364 | 7.2406 | 7.2445 | 8.0693 |
| Example 2 | EN | 7.3921 | 7.4202 | 7.2292 | 7.3974 | 7.4507 |
| | CC | 0.9829 | 0.9838 | 0.9793 | 0.9794 | 0.9858 |
| | SCC | 0.9622 | 0.9615 | 0.9365 | 0.9395 | 0.9709 |
| | ERGAS | 2.9884 | 2.9403 | 4.0139 | 3.3919 | 2.6578 |
| | AG | 13.6809 | 13.6265 | 12.6374 | 12.6409 | 13.92 |
| Example 3 | EN | 7.1483 | 7.1740 | 6.9602 | 7.1276 | 7.2365 |
| | CC | 0.9793 | 0.9806 | 0.9763 | 0.9767 | 0.9837 |
| | SCC | 0.9685 | 0.9688 | 0.9478 | 0.9531 | 0.9777 |
| | ERGAS | 3.4178 | 3.3157 | 4.4966 | 3.7438 | 2.9065 |
| | AG | 12.1434 | 12.1021 | 11.1256 | 11.1476 | 12.5803 |
| Example 4 | EN | 7.4123 | 7.4179 | 7.3145 | 7.4165 | 7.4683 |
| | CC | 0.9879 | 0.9889 | 0.9888 | 0.9892 | 0.9912 |
| | SCC | 0.9826 | 0.9825 | 0.9852 | 0.9853 | 0.9901 |
| | ERGAS | 1.9322 | 1.8589 | 2.1546 | 1.8573 | 1.6234 |
| | AG | 9.0734 | 9.0160 | 8.5957 | 8.5636 | 9.3449 |

5 结 论

对于遥感图像融合,通常很难得到一个空间分辨率高,光谱失真少的融合图像。为充分利用低分辨率

多光谱图像的空间信息,提出了一种基于低分辨率多光谱图像超分辨率处理的遥感图像融合方法。对低分辨率多光谱图像进行基于稀疏表示的图像超分辨率处理,在保持其光谱信息的基础上增强其空间信息;利用静态小波变换对增强多光谱图像的亮度分量 Y 和全色图像进行融合;由 YUV 逆变换得到融合多光谱图像。在四组真实遥感图像上验证了此算法的优越性。实验结果表明该算法与其他融合方法相比较,能有效提高融合图像的空间细节信息,同时保留了光谱信息。此外,此方法可应用到其他任意需要将多光谱图像进行放大的融合方法中。如果采用更加复杂的融合策略,其融合质量将会得到进一步提升。

参 考 文 献

- 1 Simone G, Farina A, Morabito F C, *et al.*. Image fusion techniques for remote sensing applications[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(1): 3-15.
- 2 Pohl C, van Genderen J L. Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods, and applications[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823-854.
- 3 Zhang Libao, Zhang Jue. A new adaptive fusion method based on saliency analysis for remote sensing images[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0114001.
张立保, 章 珏. 基于显著性分析的自适应遥感图像融合[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0114001.
- 4 Guo Yulong, Wang Yongbo, Li Yunmei, *et al.*. Research of multi-source waterremote image fusion algorithm based onbio-optical model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0410001.
郭宇龙, 王永波, 李云梅, 等. 基于生物光学模型的水体多源遥感图像融合算法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0410001.
- 5 Zhou Yuren, Geng Aihun, Wang Ying, *et al.*. Contrast enhanced fusion of infrared and visible images[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0909001.
周渝人, 耿爱辉, 王 莹, 等. 基于对比度增强的红外与可见光图像融合[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0909001.
- 6 Cai Zhishan, Chen Musheng. Study on multi-focus image fusion method based on wavelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091003.
蔡植善, 陈木生. 基于小波变换的多聚焦图像融合方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091003.
- 7 Tu T M, Huang P S, Hung C L, *et al.*. A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 309-312.
- 8 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.
- 9 Choi M. A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(6): 1672-1682.
- 10 Laben C A, Brower B V. Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery using Pan-Sharpener: US 6, 011, 875[P]. 2000-01-04.
- 11 Ghassemian H. A retina based multi-resolution image-fusion[C]. *IGARSS*, 2001, 2: 709-711.
- 12 Pradhan P S, King R L, Younan N H, *et al.*. Estimation of the number of decomposition levels for a wavelet-based multiresolution multisensor image fusion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3674-3686.
- 13 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.
- 14 Choi M, Kim R Y, Nam M R, *et al.*. Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the curvelet transform [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 136-140.
- 15 Zheng S, Shi W L, Liu J, *et al.*. Remote sensing image fusion using multiscale mapped LS-SVM[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1313-1322.
- 16 Liu B, Li K, Liu W J, *et al.*. Construction method of three-channel non-separable symmetric wavelets with arbitrary dilation matrices and its applications in multispectral image fusion[J]. *IET*, 2013, 7(7): 679-685.
- 17 Otazu X, Gonzalez-Audicana M, Fors O, *et al.*. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2376-2385.
- 18 Shah V P, Younan N H, King R L. An efficient pan-sharpening method via a combined adaptive PCA approach and contourlets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1323-1335.

- 19 Wu Yiquan, Tao Feixiang. Multispectral and panchromatic image fusion based on improved projected gradient NMF in NSST domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0410005.
吴一全, 陶飞翔. 改进投影梯度 NMF 的 NSST 域多光谱与全色图像融合[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0410005.
- 20 Yang J C, Wright J, Huang T S, *et al.*. Image super-resolution via sparse representation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(11): 2861–2873.
- 21 Li S. Multisensor remote sensing image fusion using stationary wavelet transform: Effects of basis and decomposition level [J]. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 2008, 6(1): 37–50.
- 22 Freeman W T, Pasztor E C, Carmichael O T. Learning low-level vision[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 40(1): 25–47.
- 23 Sun J, Zheng N N, Tao H, *et al.*. Image hallucination with primal sketch priors[C]. 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003, 2: II-729–36.
- 24 Li S T, Yang B, Hu J W. Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion[J]. *Information Fusion*, 2011, 12(2): 74–84.

栏目编辑: 苏 岑