基于 MTF 和变分的全色与多光谱图像融合模型

周雨薇 1 杨平吕² 陈强¹ 孙权森¹

摘 要 Pan-sharpening 将高分辨率图像全色 (Panchromatic, Pan) 波段的空间细节注入多光谱 (Multispectral, MS) 波段,以生成同时具有高光谱和高空间分辨率的多光谱图像.为改善融合效果,需要考虑多光谱和全色波段的调制传输函数 (Modulation transfer function, MTF).本文提出了一个新的基于 MTF 和变分的 Pan-sharpening 模型. 该模型的能量泛函包括两项,第1项为细节注入项,基于高通滤波器从 Pan 波段中提取细节信息并注入融合图像;第2项为光谱保真项,基于 MTF 设计多孔小波的低通滤波器以保持 MS 波段的多光谱信息.在 QuickBird、IKONOS 和 GeoEye 数据集上的融合结果表明,该模型可以生成同时具有高空间和高光谱质量的融合图像,融合效果优于 AWLP、IHS_BT、HPM-CC-PSF、NAWL、快速变分等算法.

关键词 图像融合, Pan-sharpening, 调制传输函数, 变分, 多孔小波

引用格式周雨薇,杨平吕,陈强,孙权森.基于 MTF 和变分的全色与多光谱图像融合模型.自动化学报,2015,41(2): 342-352

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140121

Pan-sharpening Model Based on MTF and Variational Method

 $\rm ZHOU \ Yu-Wei^1 \qquad YANG \ Ping-Lv^2 \qquad CHEN \ Qiang^1 \qquad SUN \ Quan-Sen^1$

Abstract In order to provide the multispectral (MS) image with both high spectral and high spatial resolution, pansharpening approach introduces the spatial details of Panchromatic (Pan) band into MS band. Modulation transfer function (MTF) of MS and Pan bands is necessary for high fusion quality. This paper proposes a novel pan-sharpening model based on MTF and variational method. The energy functional of the proposed model consists of two terms. The first one is the spatial detail injection term, which injects detail information extracted from Pan band by a high-pass filter into MS image. The second one is the spectral signature preserving terms, in which a low-pass filter of "à trous" wavelet is designed to maintain the multispectral information based on MTF of MS band. The experimental results on QuickBird/IKONOS/GeoEye datasets demonstrate that this model can produce the fused MS image with high spectral and high spatial quality. The proposed model is superior to AWLP, IHS_BT, HPM-CC-PSF, NAWL and fast variational method in fusion performance.

Key words Image fusion, pan-sharpening, modulation transfer function (MTF), variational method, "à trous" wavelet **Citation** Zhou Yu-Wei, Yang Ping-Lv, Chen Qiang, Sun Quan-Sen. Pan-sharpening model based on MTF and variational method. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(2): 342–352

高分辨率遥感卫星如 QuickBird、IKONOS、

本文责任编委 周杰

Recommended by Associate Editor ZHOU Jie

1. 南京理工大学计算机科学与工程学院 南京 210094 2. 解放军理 工大学气象海洋学院 南京 211101

1. School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094 2. Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

GeoEye 能够同时提供多光谱 (Multispectral, MS) 波段和全色 (Panchromatic, Pan) 波段图像. MS 图 像具有较高的光谱分辨率,但其空间分辨率较低;与 之相反, Pan 图像具有较高的空间分辨率,光谱分辨 率较低. 然而,在遥感应用如目视解译、变化检测等 任务中需要 MS 图像同时具有高空间和高光谱分辨 率. Pan-sharpening 方法将 Pan 波段的空间细节信 息注入 MS 波段以提高其空间分辨率,同时尽可能 地保持 MS 波段的光谱特性^[1-2].

目前常用的 Pan-sharpening 方法主要有分量 替换法 (Component substitution, CS)、多分辨率 分析 (Multiresolution-analysis, MRA) 融合方法和 CS 与 MRA 相结合的方法^[3]. IHS 融合^[4-5]、PCA 融合^[6] 均属于 CS 方法, 该模型直接用 Pan 波段图 像替换 IHS 的 I 分量或 PCA 的第一主分量, 再经

收稿日期 2014-03-03 录用日期 2014-08-29

Manuscript received March 3, 2014; accepted August 29, 2014 国家自然科学基金 (41174164, 61273251, 61473310, 41275029), 中国航天科技集团公司航天科技创新基金资助项目 (casc05131418), 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201306068), 北极阁基金 (BJG201209) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (41174164, 61273251, 61473310, 41275029), Aerospace Science and Technology Innovation Fund of China Aerospace Science and Technology Corporation (casc05131418), China Research and Development Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) (GYHY201306068), and the BeiJiGe Fund (BJG201209)

反变换后生成融合图像. CS 方法计算效率高, 但是 融合图像的光谱失真较大. IHS_BT^[7] 是一种改进的 IHS 与 Brovv 相结合的融合算法,其光谱失真较小. MRA 方法如小波变换融合^[1,8], Laplacian 金字塔 融合^[9] 等模型从 Pan 波段中提取细节信息注入 MS 图像中,有效地解决了融合图像的光谱失真现象. MRA 方法根据 ARSIS^[10-11] 模型将高频信息注入 MS 波段中, 注入方式由波段间结构模型 (Interband structure model, IBSM)^[10]确定. AWLP (Additive wavelet luminance proportional)^[1], AWRGB (Additive wavelet RGB)^[8] 基于多孔小波从 Pan 图 像中获得小波面即高频信息, AWLP 根据 MS 图像 中每个波段所占的亮度比例注入空间细节. MRA 和 CS 相结合的方法基于多分辨率分析将 Pan 波 段图像与成份替换图像融合,再经反变换后生成融 合结果^[1,8,12-13]; AWI^[8] 算法将多孔小波与 IHS 方 法相结合, 融合图像取得了较高的空间和光谱分辨 率.为了更好地解决光谱失真问题,需要考虑 MS 和 Pan 波段图像的 MTF (Modulation transfer function) 值对融合质量的影响^[11,14]. MTF 值反映了图 像成像的质量, MS 和 Pan 波段图像的采样频率、分 辨率大小等原因造成两者之间 MTF 值的差异^[11]. AWLP 在 QuickBird 和 IKONOS 数据集上能够取 得较好的融合结果,这是因为算法使用的低通滤波 器对应的 MTF 值为 0.185, 与 Pan 波段的 MTF 值 接近^[14]. 近年来国内外在 Pan-sharpening 模型方 面的工作包括通用分量替换的扩展模型[15]、基于四 通道不可分加性小波的多光谱图像融合[16]、基于模 型的多光谱图像融合[17] 和快速变分融合等算法[18]. 通用分量替换的扩展模型构建了新的高通滤波融合 方案. 基于四通道不可分加性小波的多光谱图像融 合方法设计了四通道对称不可分小波滤波器组,基 于加性小波实现 MS 与 Pan 图像的融合. 基于模型 的多光谱图像融合算法考虑低空间分辨率的多光谱 图像与高空间分辨率的全色波段图像的相关性以及 正则化项对融合结果的影响. 快速变分融合算法定 义的能量泛函包含4个部分,分别是梯度能量项、辐 射畸变能量项、通道相关能量项和逆扩射项,极小化 能量泛函获得融合后的图像,该算法能够获得较理 想的融合结果.

本文分析了根据 MS 波段的 MTF 值构建多孔 小波低通滤波器的方法,提出了基于 MTF 和变分 的融合模型.QuickBird、IKONOS 和 GeoEye 数 据集上的实验结果表明,该模型能够生成同时具有 高空间和高光谱质量的融合图像.

本文第1节介绍 MS 波段的 MTF 计算及多 孔小波低通滤波器的设计方法;第2节提出 MS 和 Pan 图像的融合模型;第3节分析实验结果;最后讨 论和总结全文.

1 MTF 计算及多孔小波低通滤波器的设计

1.1 MTF 计算

MTF 是光学成像系统性能评价的重要指标之 一^[19].目前,常用的 MTF 值计算方法有冲击输入 法、正弦输入法、相片判读法、脉冲法和刃边法^[19]. 本文使用刃边法计算 MTF 值,其优点在于对采样 图像质量要求不高,易于实现.刃边法的步骤如下:

1)选取刃边图像,要求刃边两侧区域灰度均匀, 且对比度较高.对每一行的像素作微分处理,与相邻 像素差异最大的点即为刃边点.对求得的刃边点进 行最小二乘拟合.

2) 对图像的每一行做三次样条插值,以使曲线 更平滑,从而提高 MTF 值的计算精度.每一行以拟 合后的刃边为基准进行对准,求得平均边缘扩展函 数 (Edge spread function, ESF) 曲线.

3) 对 ESF 曲线微分求得线扩展函数 (Line spread function, LSF) 曲线.

4) 对 LSF 曲线做离散傅里叶变换, 即得 MTF 曲线.

5) 计算图像 MTF 值.

通常,图像质量评估采用截断归一化 Nyquist 频率处的 MTF 值作为图像的 MTF 值^[19].对于 QuickBird、IKONOS 和 GeoEye 遥感图像,Pan 波段的截断归一化 Nyquist 频率为 0.5 Hz, MS 波 段的截断归一化 Nyquist 频率为 0.125 Hz^[11].图 1 为本文实验 1 中 QuickBird 图像 R 通道使用刃边 法拟合的 MTF 曲线,其在截断归一化 Nyquist 频 率处的 MTF 值为 0.27 Hz.



1.2 多孔小波低通滤波器的设计

基于 MTF 和变分的融合模型在迭代过程中需 要对 Pan 波段和融合后的 MS 波段做多孔小波分 解. 对于 Pan 波段,使用 Laplacian 高通滤波器;对 于融合后的 MS 波段,则基于其 MTF 值设计相应 的低通滤波器.多孔小波每做一层分解,需要在当前 滤波器的每两项之间插 0. 设 p_0 为 Pan 波段, H 为 Laplacian 滤波器, Pan 波段的高频信息由多孔小波分解而得的小波面 确定:

$$\begin{cases} f_H(p_0) = w_1, \ p_1 = p_0 - w_1 \\ f_H(p_1) = w_2, \ p_2 = p_1 - w_2 \\ \vdots \\ f_H(p_k) = w_{k+1}, \ p_{k+1} = p_k - w_{k+1} \end{cases}$$
(1)

其中, $f_H(p_k)$ 表示 $H * p_k$, * 为卷积操作, 通过多孔 小波实现, w_k 为每一层分解的小波面, p_k 为近似分 量, 高通滤波得到的高频信息为 $\sum_{k=1}^{n} w_k$, n 为分解 层数.

根据 Wald 协议, 融合后的图像经 MTF 对应的 低通滤波器滤波并下采样后, 应与融合前的 MS 波 段图像一致^[3].

在实际应用中,常采用高斯函数逼近 MTF 曲 线^[19].由于高斯函数满足 MTF 曲线的单调性与零 频处的逼近条件,调节其特征参数,可以达到适定的 逼近精度.

根据高斯模型, 定义:

$$MTF(x) = k \exp\left(-\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right)$$
(2)

其中, $x (0 \le x \le 1)$ 为归一化采样频率, μ, σ, k 为 待定参数. 由 MTF 曲线的对称性, 可得 $\mu = 0$; 根 据 MTF 曲线在零频处的逼近条件 *MTF* (0) = 1, 有 k = 1. 故式 (2) 可写为

$$MTF(x) = \exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2}) \tag{3}$$

前文已经通过刃边法求得图像在截断 Nyquist 频率 x_0 处的 MTF 值, 则 σ 可通过式 (4) 求得:

$$\sigma = \sqrt{-\frac{x_0^2}{2\log(MTF(x_0))}} \tag{4}$$

根据 MTF 值和式 (2) 构建低通滤波器的方法 如下:

1) 根据滤波器窗口大小和 MTF 确定 σ 值.

若滤波器窗口大小为 5×5,则窗口半径为 $2\sqrt{2}$, MS 波段的截断归一化 Nyquist 频率对应于 $x_0 = \sqrt{2}$.由于图像在截断归一化 Nyquist 频率处的 MTF 值已经获得,带入式 (4) 中求得 σ .

2) 通过式 (3) 计算滤波器窗口中每一点的 MTF 值.

3) 对上一步得到的滤波器做逆 Fourier 变换, 生成空域中与 MTF 对应的低通滤波器.

设 f_i 为融合后的 MS 第i 波段图像, L_i 为 MS 第i 波段 MTF 对应的低通滤波器, f_i 图像经多孔

小波多层分解可得到近似图像:

$$f_{L_i}(f_i) = Lf_{i,1}, f_{L_i}(Lf_{i,1}) = Lf_{i,2}, \cdots, f_{L_i}(Lf_{i,k-1}) = Lf_{i,k}$$
(5)

其中, $f_{L_i}(f_i)$ 表示 $L_i * f_i$, * 为卷积操作, k 为分解 层数, $Lf_{i,k}$ 为 k 层多孔小波分解后得到的近似图 像. 为保持融合图像 f_i 的光谱特性, 根据 Wald 协 议, 图像 $Lf_{i,k}$ 应与融合前第 i 波段多光谱图像上采 样到 Pan 波段分辨率后的图像相似, k 的取值由全 色与多光谱波段的分辨率之比确定.

2 基于 MTF 和变分的融合模型

2.1 融合模型

由于图像融合需要在提高空间分辨率的同时保 持光谱分辨率,定义如下能量泛函:

$$E(f_i) = \frac{1}{2} \int (gain \times H * Pan - H * f_i)^2 dx + \frac{\lambda}{2} \int (L_i * f_i - MS_i)^2 dx$$
(6)

其中, i= R, G, B, NIR, 分别为 MS 的红、绿、蓝 和近红外波段. *Pan* 为全色图像, *MS_i* 为上采样 到 Pan 波段分辨率的第 *i* 波段的 MS 图像, *f_i* 为第 *i* 波段的融合后的图像, 初始值为 *MS_i*, *H* 为高通 滤波器, *L_i* 为根据不同波段 MTF 值设计的低通滤 波器, *gain* (*gain* \geq 1) 为略大于 1 的增益系数, 本 文取 1.1, λ 为权重系数, * 为卷积, 融合过程中, 基 于多孔小波变换实现高通和低通滤波. 对于 Quick-Bird、IKONOS 和 GeoEye 图像, 由于 Pan 和 MS 波段的分辨率之比为 4:1, 小波分解的层数应为 2.

能量泛函的第 1 项为空间细节注入项, H*Pan和 $H*f_i$ 分别提取 Pan 波段和融合后的 MS 第 i 波 段图像的高频信息,当该能量项取极小值时, Pan 波 段图像的高频信息被注入到融合后图像的第 i 波段. 第 2 项为光谱保真项, 极小化该能量项, 融合后图像 第 i 波段经低通滤波后的图像与原 MS 的第 i 波段 图像相似, 满足了 Wald 协议对融合图像保持光谱 特性的要求. λ 为光谱保真项的权重系数, 决定了 Pan 波段空间细节注入的多少和 MS 波段光谱保真 程度的高低, 其取值通过实验确定.

为生成融合图像 f_i , 取:

$$\hat{f}_i = \min E(f_i) \tag{7}$$

令:

$$F(f_i) = \frac{1}{2}(gain \times H * Pan - H * f_i)^2 + \frac{\lambda}{2}(L_i * f_i - MS_i)^2$$
(8)

能量泛函的一阶变分为

$$\frac{\delta E(f_i)}{\delta f_i} = F_{f_i} = -(H^* * (gain \times H * Pan - H * f_i)) + \lambda(L_i^* * (L_i * f_i - MS_i))$$
(9)

其中, (·)* 为 (·) 的伴随矩阵. 引入时间变量 *t*, 梯度 下降流为

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = -\frac{\delta E(f_i)}{\delta f_i} \tag{10}$$

式(10)的数值差分格式为

$$\begin{cases} f_i^{n+1} = f_i^n + \Delta t((H^* * (gain \times H * Pan - H * f_i^n)) - \lambda(L_i^* * (L_i * f_i^n - MS_i))) \\ \lambda(L_i^* * (L_i * f_i^n - MS_i))) \\ f_i^0 = MS_i \end{cases}$$
(11)

当 $\frac{||f_i^{n+1} - f_i^n||}{||f_i^n||} < \varepsilon$ 时,结束迭代并获得融合后的 MS 第 *i* 波段图像 f_i ,其中 ε 为充分小的常数.

融合模型式 (11) 中多孔小波的卷积运算使 用快速傅里叶变换,因此,算法的时间复杂度为 O(r · m log m), r 为迭代次数, m 为图像大小.

2.2 基于 MTF 和变分的 Pan-sharpening 融合 算法步骤

基于 MTF 和变分的 Pan-sharpening 融合算法:

1) MS 图像上采样至与 Pan 图像同分辨率.

2) 对 MS 图像和 Pan 图像进行配准.

3) 使用刃边法计算 MS 图像中 R、G、B、NIR 通道的 MTF 值.

4) 根据计算出的 MS 图像每个通道的 MTF 值 构建相应的低通滤波器 *L_i*.

5) 根据融合模型迭代求解融合图像 f_i.

b) 初始化: $f_i^0 = MS_i$;

c) while
$$\frac{||f_i^{n+1} - f_i^n||}{||f_i^n||} > \varepsilon$$

$$\begin{aligned} f_i^{n+1} &= f_i^n + \Delta t ((H^* * (gain \times HP - H^* + f_i^n)) - \lambda (L_i^* * (L_i * f_i^n - MS_i))) \end{aligned}$$

end;

d) 生成融合图像 f_i^{n+1} .

3 实验结果及分析

3.1 图像融合评价指标

为了定量分析融合结果, 按照 Wald 协议^[3], 对 融合图像的每个通道使用 MTF 对应的低通滤波 器滤波,并向下重采样到原分辨率后与 MS 图像比较,计算光谱失真度 (ERGAS)^[20]、波段相关系数 $(CC)^{[21]}$ 、图像质量指数 $(QI)^{[22]}$ 和空间相关系数 (Spatial correlation coefficient, sCC)^[23].

ERGAS 反映了融合图像的光谱失真程度:

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \frac{RMSE^2(B_i)}{\mu_i^2}}$$
 (12)

其中, h 为高分辨率图像的分辨率, l 为低分辨率 图像的分辨率, B_i 为图像的第 i 个波段, μ_i 为第 i 个波段的平均灰度, L 为参与融合计算的通道数, RMSE (Root mean square error) 为融合图像经低 通滤波并下采样后与原 MS 波段图像的均方根误差. ERGAS 越低, 融合图像的光谱质量越高.

波段相关系数 (CC) 定义如下:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (x(i,j) - \bar{x})(y(i,j) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (x(i,j) - \bar{x})^2 (y(i,j) - \bar{y})^2}}$$
(13)

其中, x(i, j) 为参考图像, y(i, j) 为融合后图像, $M \times N$ 为图像大小, \bar{x}, \bar{y} 分别为参考图像和融合 图像的均值. CC 取值范围为 [0,1], 其值越大, 融合 效果越好.

图像质量指数 (QI) 用于评价融合图像的光谱 质量:

$$QI = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x}\cdot\bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}$$
(14)

其中, \bar{x}, \bar{y} 分别为参考图像 x 和融合图像 y 的均值, σ_x^2, σ_y^2 分别为 x, y 的方差, σ_{xy} 为协方差. QI 值越 大, 融合图像的光谱质量越好, 融合图像与参考 MS 图像相似程度越高, QI 取值范围为 [0, 1].

sCC 反映了融合图像的空间细节信息. 使用拉普拉斯滤波器分别对 Pan 图像和融合图像滤波, 计算滤波后图像的相关系数, 即得到 sCC:

$$sCC = CC(Lap * P, Lap * y)$$
(15)

其中, *Lap* 为拉普拉斯滤波器, *P* 为 Pan 图像, *y* 为 融合后的图像. sCC 值越大, 说明 Pan 图像向融合 图像中注入的空间细节信息越多.

3.2 权重系数 **λ**的选择

基于 MTF 和变分的融合模型式 (6) 中, λ 为 权重系数, 决定了融合图像的空间细节和光谱质 量.为了确定 λ 的取值,本文通过实验分析 λ 与 ERGAS、sCC 的关系.

图 2 为 ERGAS 和 sCC 随 λ 变化的函数曲线. 从图中可以看出,随着 λ 的增大, sCC 值逐渐变小, 意味着融合图像从 Pan 中获得的细节信息变少. 同时, ERGAS 逐渐降低, 说明了融合图像的光谱保真度逐渐提高. 当 $\lambda < 1.5$ 时, ERGAS 下降较快, 而 $\lambda > 1.5$ 时, 下降趋于平缓. 为了使融合图像在提高空间分辨率的同时保持较高的光谱信息, 本文取 $\lambda = 2$.





3.3 Pan-sharpenging 融合实验与分析

为了验证算法的有效性,本文以 Quick-Bird、 IKONOS 和 GeoEye 图像作为测试 并与 AWLP^[1]、 IHS_BT^[7]、 HPM-CC-集. PSF^[15]、NAWL^[16]、快速变分^[18]等融合算法做 了比较. 其中, AWLP 在 2006 年的融合算法竞赛中 显示了优异的融合性能^[24]; IHS_BT 为最近提出的 改进的 CS 融合算法, 在提高 MS 波段空间分辨率的 同时有效地保持了其光谱特性. QuickBird 为 2002 年8月31日获得的加拿大 Fredericton 地区图像的 子集, 全色图像的空间分辨率为 0.7 m, 多光谱图像 的空间分辨率为 2.8 m, 包含红、绿、蓝和近红外四 个波段, 全色图像大小为 1024 像素 × 1024 像素. IKONOS 为 2007 年 3 月 29 日获得的上海地区图 像的子集,全色图像的空间分辨率为1m,多光谱图 像的空间分辨率为4m,同样包含红、绿、蓝和近红 外四个波段, 全色图像大小为 1024 像素 × 1024 像 素.为了比较各个方法的融合效果,QuickBird 显示 的子图大小为 512 像素 × 768 像素; IKONOS 子图 的大小为 512 像素 × 512 像素.

本文中, QuickBird 和 IKONOS 的四个波段 实测 MTF 值分别为 MTF_QB = [0.27, 0.26, 0.34, 0.20], MTF_IK = [0.29, 0.27, 0.25, 0.27]. 该数据与 标准的 MTF 值有区别, 这是因为在卫星飞行过程 中, 传感器的 MTF 值会逐渐下降. 融合算法的其他 参数设置为: $\Delta t = 0.2$; $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$. 本文对实验 结果做了定性和定量评价.

图 3 为 QuickBird 图像上各算法的融合结 果.图 3(a)为上采样到全色波段分辨率的多光 谱 RGB 波段合成图像,图 3(b) 为全色图像,图 3(c) 为本文算法结果, 图 3(d)~图 3(h) 依次为 AWLP、IHS_BT、HPM-CC-PSF、NAWL 和快速 变分算法的融合结果.从目视效果上看, IHS_BT 算 法的融合图像存在较明显的色彩畸变,光谱信息损 失较大. HPM-CC-PSF、NAWL 虽然光谱信息保持 较好,但是纹理不够清晰,从 Pan 波段获得的空间信 息较少. 快速变分算法的目视结果与 AWLP 算法近 似,树木较清晰,且无明显的光谱失真现象,AWLP 算法在保持光谱信息和提高空间分辨率上效果均较 好. 与其他算法相比, 本文算法的空间细节对比度更 高, 如融合图像左下角的树林区域纹理更丰富; 停车 场和道路区域也更清晰.因此,本文算法在保持光谱 信息的同时更有效地提高了空间分辨率.

表 1 为 QuickBird 图像各融合算法的定量评价 结果. AWLP 算法的 CC、QI 均较高, ERGAS、sCC 较低,说明图像的光谱保真度较好,但从 Pan 图像 中获得的细节信息相对较少. IHS_BT 算法的 sCC 最高,从 Pan 波段获取的空间细节最多,但其图像 光谱失真度最大,因此 ERGAS 的值最高. HPM-CC-PSF、NAWL 保持光谱特性性能优于 IHS_BT 算法,但空间细节增强效果低于 IHS_BT,相应地, 其 sCC 指标也更低. 快速变分算法 sCC 较高, 但 ERGAS 指标也较高, 说明从 Pan 中获得了较多的 细节,但也产生了一定的光谱失真.从表1中可知, 本文算法的 sCC 均值与 IHS_BT 接近, ERGAS 指 标最低, CC 和 QI 指标值最高, 这说明在考虑了 MS 波段的 MTF 值之后, 融合模型显著地提高了 MS 波段的空间质量,与此同时仍然有效地保持了 MS 波段的光谱特征.

图 4 为 IKONOS 图像的融合结果. 从目视效果 上看, HPM-CC-PSF 算法、NAWL 算法在空间分 辨率的提高上低于其他算法. 图 4 中矩形框圈定的 部分为道路和树木区域, 图 4 (f) 中树木不如其他算 法清晰, 而图 4 (g) 中景物则较为模糊. 快速变分融 合图像整体偏暗, 在左下角屋顶区域纹理不够清晰. AWLP 和 NAWL 算法在屋顶区域 (由矩形框圈定) 出现条纹现象, 这是由于 MS 图像重采样时在该区 域出现了分块, HPM-CC-PSF、IHS_BT、快速变分 融合和本文算法的结果在该区域较为平滑, 这说明 本文算法在提高空间分辨率和保持光谱分辨率之间 取得了一个相对较好的平衡.

表 2 为 IKONOS 图像各融合算法的定量评价 结果.相比于本文算法,AWLP 算法的 sCC、CC、QI 较低,而 ERGAS 较高,说明融合图像光谱的保真 度和从 Pan 图像获得细节信息的能力都低于本文算 法. IHS_BT 算法的 sCC 和 ERGAS 最高,说明融 合图像在从 Pan 图像获得较多空间信息的同时产 生了较大的光谱失真. HPM-CC-PSF、NAWL 和 快速变分算法的 sCC 较低,说明空间细节增强效 果低于其他方法. 与 IHS_BT 算法相比, HPM-CC-PSF、NAWL 和快速变分算法的 ERGAS 值更低, 说明了对光谱特性的保持效果相对更好,但其光谱 保持能力仍然低于 AWLP 和本文算法. 本文算法的 sCC 仅次于 IHS_BT,但 ERGAS 最低, CC 和 QI 指标最高,说明本文的模型在提高空间分辨率的同 时更有效地保持了 MS 波段的光谱特征.

本文及其他算法在 GeoEye 数据集上的融合结 果如图 5 和表 3 所示, GeoEye 图像来自 GeoEye 官 网提供的样例. 全色图像的空间分辨率为 0.5 m, 多 光谱图像的空间分辨率为 2 m, 包含红、绿、蓝和近 红外四个波段, 全色图像大小为 1024 像素×1024 像素.为了比较各个方法的融合效果,显示的子图大 小为 400 像素×400 像素.图 5 为 GeoEye 图像的 融合结果.

从目视效果上看,本文算法得到的融合图像最 清晰,尤其是树木部分,且不存在光谱失真现象. AWLP 算法略逊于本文算法,树木部分不够清晰, 光谱保持度较高. IHS_BT 算法图像清晰度较高,但 产生了较严重的颜色失真, HPM-CC-PSF、快速变 分、NAWL 算法结果不够清晰,效果差于本文算法 及 AWLP 算法.

表 3 为 GeoEye 融合的定量评价结果. 除 G 通道、B 通道的 sCC 略逊于 IHS_BT 算法外,本 文算法的各项指标均优于其他算法,说明本文算 法在保持光谱分辨率的同时有效地提高了空间分 辨率. AWLP 算法同样较好地提高了空间分辨率. IHS_BT 算法的 sCC、ERGAS 均较高,说明从 Pan 波段注入了过多的空间细节,同时也造成了较大的 光谱失真. HPM-CC-PSF、NAWL 及快速变分算 法的各项指标均低于本文算法,说明本文模型能够 兼顾提高多光谱图像的空间分辨率与保持其光谱分 辨率,以便于后续的目视解译与目标分类等工作.

为了进一步验证本文算法的有效性,在Quick-Bird、IKONOS和GeoEye数据集中又分别选取了10组全色及多光谱波段图像,使用本文方法及AWLP算法分别做融合试验,统计ER-GAS、sCC、CC、QI四个参数.实验表明,本文算法在4个指标上均优于AWLP算法,以Quick-Bird结果为例,从图6可以看出,本文算法的ER-GAS、sCC、CC、QI均优于AWLP,虽然CC、QI与AWLP算法的结果较为接近,但是ERGAS及sCC 明显优于AWLP 算法,说明本文方法的多光谱波段光谱保真能力优于AWLP,同时模型能够向多光谱图像中注入更多的空间细节信息.

评价指标	波段	本文算法	AWLP	IHS_BT	HPM-CC-PSF	NAWL	快速变分
	R	0.9390	0.9167	0.9643	0.8878	0.8952	0.9225
sCC	G	0.9271	0.9144	0.9574	0.8901	0.8818	0.9221
	В	0.9162	0.8921	0.9424	0.8563	0.8694	0.9151
	NIR	0.9902	0.8699	0.9344	0.9197	0.9510	0.9071
	均值	0.9431	0.8983	0.9496	0.8885	0.8994	0.9167
ERGAS		2.3108	2.5415	6.1868	3.5163	2.8730	3.1039
	R	0.9884	0.9862	0.9213	0.9773	0.9802	0.9805
$\mathbf{C}\mathbf{C}$	G	0.9858	0.9832	0.9058	0.9716	0.9775	0.9773
	В	0.9871	0.9838	0.9131	0.9777	0.9769	0.9785
	NIR	0.9909	0.9885	0.9537	0.9687	0.9828	0.9823
QI	均值	0.9881	0.9854	0.9235	0.9738	0.9793	0.9797
	R	0.9825	0.9792	0.8954	0.9674	0.9734	0.9704
	G	0.9791	0.9753	0.8819	0.9594	0.9705	0.9664
	В	0.9808	0.9765	0.8800	0.9666	0.9697	0.9681
	NIR	0.9891	0.9855	0.9318	0.9597	0.9815	0.9753
	均值	0.9829	0.9791	0.8977	0.9633	0.9738	0.9700

表 1 QuickBird 图像各融合方法的定量评价结果 Table 1 Quantative assessment of different fusion methods for QuickBird imagery



(a) QuickBird R、G、B 波段合成图像 (a) QuickBird true-color image of band R, G and B



(c) 本文算法融合结果 (c) Fusion result of the proposed algorithm



(b) QuickBird 全色波段图像(b) Pan image of QuickBird



(d) AWLP 融合结果 (d) Fusion result of AWLP



(e) IHS_BT 融合结果 (e) Fusion result of IHS_BT



(f) HPM-CC-PSF 融合结果 (f) Fusion result of HPM-CC-PSF



(g) NAWL融合结果 (g) Fusion result of NAWL



(h)快速变分融合结果 (h) Fusion result of fast variational model

图 3 QuickBird 图像融合结果比较 Fig. 3 Fusion result comparison of QuickBird imagery



Fig. 4 Fusion result comparison of IKONOS imagery

表 2 IKONOS 图像各融合方法的定量评价结果	
---------------------------	--

Table 2	Quantative	assessment	of	different	fusion	methods	for	IKONOS	imagery
---------	------------	------------	----	-----------	--------	---------	-----	--------	---------

评价指标	波段	本文算法	AWLP	IHS_BT	HPM-CC-PSF	NAWL	快速变分
sCC	R	0.9864	0.9723	0.9932	0.9617	0.9532	0.9631
	G	0.9841	0.9718	0.9926	0.9582	0.9514	0.9630
	В	0.9879	0.9701	0.9882	0.9557	0.9561	0.9627
	NIR	0.9889	0.9401	0.9843	0.9617	0.9547	0.9619
	均值	0.9868	0.9636	0.9896	0.9607	0.9538	0.9627
ERGAS		3.2032	3.3900	4.4299	4.1280	3.5441	4.1468
CC	R	0.9798	0.9776	0.9619	0.9659	0.9727	0.9679
	G	0.9801	0.9776	0.9634	0.9663	0.9741	0.9686
	В	0.9805	0.9773	0.9625	0.9556	0.9726	0.9694
	NIR	0.9747	0.9721	0.9502	0.9522	0.9669	0.9579
	均值	0.9788	0.9762	0.9595	0.9625	0.9716	0.9659
QI	R	0.9738	0.9711	0.9467	0.9595	0.9684	0.9553
	G	0.9728	0.9695	0.9449	0.9566	0.9680	0.9545
	В	0.9731	0.9692	0.9417	0.9545	0.9653	0.9555
	NIR	0.9652	0.9602	0.9390	0.9313	0.9592	0.9347
	均值	0.9712	0.9675	0.9431	0.9505	0.9652	0.9500



	Fable 3	Quantative	assessment	of	different	fusion	methods	for	GeoEye	imagery
--	---------	------------	------------	----	-----------	--------	---------	-----	--------	---------

评价指标	波段	本文算法	AWLP	IHS_BT	HPM-CC-PSF	NAWL	快速变分
	R	0.9803	0.9521	0.9734	0.9467	0.9441	0.9392
~~	G	0.9821	0.9629	0.9968	0.9558	0.9478	0.9389
sCC	В	0.9787	0.9483	0.9950	0.9372	0.9463	0.9354
	NIR	0.9799	0.9136	0.9187	0.9002	0.9468	0.9334
	均值	0.9803	0.9442	0.9710	0.9397	0.9463	0.9367
ERGAS		2.1106	2.2344	5.4928	3.2762	2.4426	2.6878
	R	0.9913	0.9907	0.9458	0.9757	0.9883	0.9863
00	G	0.9890	0.9878	0.9226	0.9723	0.9846	0.9831
CC	В	0.9885	0.9867	0.9269	0.9750	0.9830	0.9825
	NIR	0.9890	0.9864	0.9410	0.9763	0.9803	0.9805
	均值	0.9894	0.9880	0.9341	0.9748	0.9840	0.9831
	R	0.9891	0.9880	0.9240	0.9712	0.9864	0.9817
	G	0.9860	0.9848	0.8869	0.9654	0.9822	0.9775
QI	В	0.9856	0.9836	0.8871	0.9685	0.9806	0.9774
	NIR	0.9870	0.9829	0.9326	0.9750	0.9785	0.9747
	均值	0.9869	0.9849	0.9077	0.9700	0.9819	0.9778



图 6 QuickBird 数据集融合结果分析 Fig. 6 Fusion result analysis of QuickBird dataset

4 总结

本文提出了一种根据图像的 MTF 值构建低 通滤波器的方法,并将构建的滤波器应用于 Pansharpening 模型以降低注入空间细节到多光谱波段 时造成的光谱失真.从视觉效果上看,本文算法获得 的融合图像清晰,具有较高的空间分辨率和光谱分 辨率.从融合指标来看,本文方法能够在提高 MS 波 段图像空间分辨率的同时更有效地保持其光谱特性, 总体融合性能优于其他算法.目前,模型不能自适 应地选择权重系数,这是下一步工作的研究方向.此 外,将本文方法拓展到其他类型的遥感图像融合任 务,如高光谱图像与全色图像的融合也是另一个研 究目标.

References

- Otazu X, Gonzalez-Audicana M, Fors O, Nunez J. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2376-2385
- 2 Amro I, Mateos J, Vega M, Molina R, Katsaggelos A K. A survey of classical methods and new trends in Pansharpen-

ing of multispectral images. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011. 79

- 3 Khan M M, Alparone L, Chanussot J. Pansharpening quality assessment using the modulation transfer functions of instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(11): 3880–3891
- 4 Tu T M, Su S C, Shyu H C, Huang P S. A new look at IHSlike image fusion methods. *Information Fusion*, 2001, 2(3): 177–186
- 5 Tu T M, Huang P S, Huang C L, Chang C P. A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 309–312
- 6 Chavez P S Jr, Sides S C, Anderson J A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Pho*togrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991, **57**(3): 295-303
- 7 Tu T M, Hsu C L, Tu P Y, Lee C H. An adjustable Pan-sharpening approach for IKONOS/QuickBird/GeoEye-1/WorldView-2 imagery. *IEEE Journal of Selected Topics* in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(1): 125-134
- 8 Nunez J, Otazu X, Fors O, Prades A, Pala V, Arbiol R. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3): 1204–1211

- 9 Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, Garzelli A. Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(10): 2300–2312
- 10 Ranchin T, Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, Wald L. Image fusion-the ARSIS concept and some successful implementation schemes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, **58**(1–2): 4–18
- 11 Massip P, Blanc P, Wald L. A method to better account for modulation transfer functions in ARSIS-based pansharpening methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(3): 800–808
- 12 Gonzalez-Audicana M, Saleta J L, Catalan R G, Garcia R. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(6): 1291–1299
- 13 Shah V P, Younan N H, King R L. An efficient Pansharpening method via a combined adaptive PCA approach and contourlets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1323-1335
- 14 Garzelli A, Nencini F. Interband structure modeling for Pansharpening of very high-resolution multispectral images. Information Fusion, 2005, 6(3): 213–224
- 15 Dou Wen, Chen Yun-Hao. Mage fusion method of high-pass modulation including interband correlations. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(2): 140-144 (窦闻,陈云浩. 计入波段间相关性的高通调制图像融合方法. 红外 与毫米波学报, 2010, 29(2): 140-144)
- 16 Liu Bin, Peng Jia-Xiong. Fusion method of multi-spectral image and panchromatic image based on four channels nonseparable additive wavelets. *Chinese Journal of Computers*, 2009, **32**(2): 350-356 (刘斌, 彭嘉雄. 基于四通道不可分加性小波的多光谱图像融合. 计 算机学报, 2009, **32**(2): 350-356)
- 17 Aly H A, Sharma G. A regularized model-based optimization framework for Pan-sharpening. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, **23**(6): 2596-2608
- 18 Zhou Z M, Li Y X, Shi H Q, Ma N, Shen J. Pan-sharpening: a fast variational fusion approach. *Science China Informa*tion Sciences, 2012, 55(3): 615–625
- Dai Qi-Yan, Xia De-Shen, He Hong-Yan, Man Yi-Yun, Zong Yun-Hua. Performance analysis of MTF measurement using edge method. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27(3): 22-27 (戴奇燕, 夏德深, 何红艳, 满益云, 宗云花. 刀刃法在轨 MTF 测量

性能分析. 航天返回与遥感, 2006, 27(3): 22-27)

- 20 Wald L. Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion? In: Proceedings of the 3rd Conference Fusion of Earth Data: Merging Point Measurements, Raster Maps and Remotely Sensed Images. Nice, France: SEE/URISCA, 2000. 99–103
- 21 Wald L, Ranchin T, Mangolini M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering & Remote* Sensing, 1997, **63**(6): 691–699
- 22 Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index. IEEE Signal Processing Letter, 2002, 9(3): 81–84

- 23 Zhou J, Civco D L, Silander J A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4): 743-757
- 24 Alparone L, Wald L, Chanussot J, Thomas C, Gamba P, Bruce L M. Comparison of Pansharpening algorithms: outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10): 3012-3021



周雨薇 南京理工大学计算机科学与工 程学院硕士研究生.主要研究方向为模 式识别,遥感图像增强和融合.

E-mail: yuwei_zhou613@163.com

(**ZHOU Yu-Wei** Master student at the School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology. Her research in-

terest covers pattern recognition, remote sensing image enhancement and fusion.)



杨平吕解放军理工大学气象海洋学院 博士研究生.主要研究方向为遥感图像 处理和分析.

E-mail: yangpinglv@gmail.com

(YANG Ping-Lv Ph. D. candidate at the Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology. His research in-

terest covers remote sensing image processing and analysis.)



陈 强 南京理工大学计算机科学与工 程学院教授. 主要研究方向为图像处理 和分析. 本文通信作者.

E-mail: chen2qiang@njust.edu.cn

(CHEN Qiang Professor at the School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology. His research interest

covers image processing and analysis. Corresponding author of this paper.)



孙权森 南京理工大学计算机科学与工 程学院教授.主要研究方向为模式识别, 图像处理,遥感信息系统.

E-mail: sunquansen@njust.edu.cn

(SUN Quan-Sen Professor at the School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology. His research interest

covers pattern recognition, image processing, and remote sensing information system.)