

文章编号: 1001-3806(2016)05-0756-06

基于多级引导滤波器的图像区域融合算法

李旭寒, 董安国*, 封建湖

(长安大学 理学院, 西安 710064)

摘要: 为了提高多光谱图像与全色图像的融合质量, 研究了多种滤波器和融合算法, 提出了基于多级引导滤波器的区域融合方法。采用该方法对多光谱图像进行插值, 利用改进的分水岭算法对全色图像进行区域划分, 并将划分结果映射至每个多光谱图像, 然后将多光谱图像与全色图像利用多级引导滤波器分别进行滤波, 得到各自的细节信息, 最后根据每个区域中全色图像和多光谱图像的关系指标局部相关系数与4阶相关系数的大小, 对细节信息进行区域融合, 得到融合后的多光谱图像。结果表明, 该算法充分保留了多光谱图像的光谱信息, 并尽可能多地注入了全色图像的细节信息, 成功地提高了多光谱图像的融合效果。

关键词: 图像处理; 图像融合; 多级引导滤波器; 分水岭分割; 4阶相关系数; 局部相关系数

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.029

Regional fusion algorithm of images based on multistage guide filters

LI Xuhan, DONG Anguo, FENG Jianhu

(School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to improve the fusion quality of multi-spectral images and panchromatic images, after studying a variety of filters and fusion algorithms, a regional fusion method was proposed based on multistage guide filters. First of all, the new method was adopted to interpolate the multispectral image; then the improved watershed algorithm was used to divide the panchromatic image, and the result was mapped to each multispectral image. Secondly, a multistage guide filter was used to filter the multispectral image and the panchromatic image, and their details were obtained respectively. Finally, according to the local correlation coefficient and the 4-order correlation coefficient between the panchromatic image and multispectral image, the detailed information was fused and the fusion images were obtained. The results show that the algorithm retains the multispectral image spectrum information and at the same time details of the panchromatic image were put into the fusion image as much as possible. The method improves the effect of multispectral image fusion.

Key words: image processing; image fusion; multistage guide filter; watershed segmentation; fourth-order correlation coefficient; local correlation coefficient

引言

随着图像融合技术的发展, 这一技术越来越多地应用到多光谱图像与全色图像的融合中, 如何有效地对多光谱图像与全色图像进行融合已成为当前遥感图像融合的重要任务之一。多光谱图像是在较窄的光谱段下形成的图像, 具有较高的光谱分辨率, 其有利于目标物体的识别与解释, 但空间分辨率低; 全色图像是在较长光谱段下形成的图像, 光谱分辨率低, 但能够很好地反映地物的空间信息及其特征细节。多光谱图像和

全色图像融合就是将多光谱图像的高光谱分辨率和全色图像的高空间分辨率进行融合, 使得融合图像同时具有它们的特点。

目前, 在遥感图像融合领域中传统的算法主要有 Brovey 变换算法、色调-亮度-饱和度 (hue, intensity, saturation, HIS) 彩色空间变换算法、主成分分析 (principal component analysis, PCA) 变换算法等^[1], 这些算法虽然运行简单、实时性较好, 但不能很好地实现多光谱与全色图像的融合; 基于多分辨率的融合方法也越来越多, 如小波变换, 虽然小波变换能够提取具有方向性的高频分量, 较好地保留图像的光谱信息, 但小波变换只能产生3个方向上的高频信息, 同时小波变换不具有平移不变性。为了克服小波变换的缺陷, DO 于2002年提出了 contourlet 变换^[2]。2006年, CUNHA 在 contourlet 变换的基础上提出了非下采样 contourlet (non-subsampled contourlet, NSCT) 变换融合算法^[3-4], 因为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11171043; 11201038)

作者简介: 李旭寒 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: donganguo@chd.edu.cn

收稿日期: 2015-06-25; 收到修改稿日期: 2015-07-22

变换过程中采用的是非下采样,所以 NSCT 具有平移不变性。这些算法虽然获得了较好的融合结果,但它们是针对整个图像场景进行处理,没有考虑空间特征不同的各个区域固有的特征^[1,5],且在细节提取过程中没有考虑融合图像的关系。近年来,将多分辨率的融合方法与其它方法相结合的融合方法越来越多,这些方法虽然考虑了空间特征不同的各个区域固有的特征,但仍有些不足之处,参考文献[1]、参考文献[6]和参考文献[7]中的方法都是基于窗口级对图像进行处理,但忽略了窗口间的相关性,具有一定的局限性。参考文献[4]中虽然是基于区域进行融合,但是分割的区域较大,且融合算法中需要人工选取两个阈值,阈值选取过大较好地保持了光谱特征,但同时导致融合图像的细节较少,融合图像呈现模糊现象^[4]。

由于全色图像和多光谱图像的空间分辨率不一致,所以相同目标在全色图像和多光谱图像中所对应的像素个数不同,要对全色图像和多光谱图像进行融合,就必须对多光谱图像进行插值,得到与全色图像分辨率一致的图像^[4]。图像融合是对插值后的多光谱图像进行融合,因此多光谱图像插值是图像融合中很重要的一步。为了得到较好的插值图像,将与多光谱图像像素点所对应的全色图像的像素点取平均值得到降质的全色图像,再以降质的全色图像为引导图像,采用引导滤波器^[8]得到降质的全色图像与多光谱图像的对应关系,并假设全色图像和插值后的多光谱图像也存在这种对应关系,从而根据全色图像得到多光谱图像需要插值的像素点的值;再对全色图像进行区域划分^[9-10],并将划分结果对应到插值后的多光谱图像,最后采用多级滤波器对全色图像和插值后的多光谱图像进行相同层数的滤波,充分考虑到了融合图像间的关系,得到各自的细节信息;然后根据各区域的局部相关系数(local correlation coefficient, LCCS)与 4 阶相关系数(fourth-order correlation coefficient, FOCC)的值制定高频系数融合规则,得到最终融合图像。实验评价指标显示,此方法在保留多光谱图像的光谱信息方面,优于 NSCT 算法、参考文献[1]中算法和参考文献[4]算法,在提高细节信息方面,优于参考文献[1]中算法和参考文献[4]中算法。本文中的主要创新点体现在采用引导滤波器对多光谱图像进行插值和细节信息提取,并结合 LCCS, FOCC 对图像高频系数进行融合。

1 多级引导滤波器

引导滤波器是由 HE^[8]等人提出来的,它是基于假设被过滤的图像和引导图像存在线性关系的前提下

实现的。一方面,引导滤波器具有很好的保留边缘、平滑噪声的作用;另一方面,在引导图像的帮助下,该滤波器可以使输出图像具有更多的边缘信息。在这里首先利用引导滤波器找出降质全色图像和多光谱图像的线性关系,再根据这种关系以全色图像为引导图像构造出多光谱图像插值点的像素值,然后再采用多级引导滤波器提取图像细节信息。对于输入图像 p , 输出图像 q 是假设在以像素点 k 为中心的窗口 ω_k 中引导图像 I 的线性变换:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in A_k, A_k = \{i | p_i \in \omega_k\} \quad (1)$$

式中, q_i 是输出图像 q 的第 i 个像素值, I_i 是引导图像 I 的第 i 个像素值, A_k 是以像素点 k 为中心的窗口 ω_k 中所有像素点的集合, ω_k 是一个大小为 $r \times r$ 的方形窗口, r 是正整数。线性系数 a_k 和 b_k 是通过建立一个代价函数模型求出输入图像 p 和输出图像 q 的最小差异而确定的,为常量。设代价函数 $Q(a_k, b_k)$ 为:

$$Q(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2] \quad (2)$$

式中, ε 为止则化参量,对 $Q(a_k, b_k)$ 实现最小化,得系数 a_k 和 b_k 为:

$$\begin{cases} a_k = \frac{|\omega|^{-1} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \\ b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ_k^2 和 μ_k 分别为窗口 ω_k 在引导图像 I 中对应像素值的方差和均值, $|\omega|$ 为在 ω_k 中的像素点个数, $\bar{p}_k = |\omega|^{-1} \sum_{i \in \omega_k} p_i$ 是窗口 ω_k 在输入图像 p 中对应的像素均值。所有像素点 i 被包含该点的多个窗口覆盖,不同窗口求出的 a_k 和 b_k 不同,故将不同窗口求出的结果的平均值作为 a_k 和 b_k 的值。因此输出图像 q 为:

$$q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i \quad (4)$$

式中, $\bar{a}_i = |\omega|^{-1} \sum_{k \in \omega_i} a_k$, $\bar{b}_i = |\omega|^{-1} \sum_{k \in \omega_i} b_k$ 。

为了实现多光谱图像(multispectral image, MI) M 和全色图像(panchromatic image, PI) P 的融合,引导滤波器推广到多级引导滤波器。为了一致性地提取细节信息, M 或 P 分别作为彼此的引导图像,如下面所描述。

由于 M 或 P 大小不一致,所以对 M 进行插值使得图像大小与 P 相同。在第 1 级($j=1$),以 M 作为引导图像提取 P 的细节信息,得到输出图像:

$$P_1 = F(P, M) \quad (5)$$

式中, P_1 是引导滤波器输出, F 是引导滤波函数。同样, M 的细节信息提取也是以 P 作为引导图像,即:

$$M_1 = F(M, P) \quad (6)$$

对于第 j 级($j > 1$),引导滤波公式如下描述:

$$\begin{cases} P_j = F(P_{j-1}, M_{d,j-1}) \\ M_j = F(M_{j-1}, P_{d,j-1}) \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_{j-1} 和 M_{j-1} 代表 P 和 M 的第 $j-1$ 级引导滤波输出。细节层 $P_{d,j}$ 和 $M_{d,j}$ 是 P 和 M 第 j 级分解出来的细节信息:

$$\begin{cases} P_{d,j} = P_{j-1} - P_j \\ M_{d,j} = M_{j-1} - M_j \end{cases} \quad (8)$$

式中, 当 $j=1$ 时, P_{j-1} 和 M_{j-1} 分别代表原全色图像和多光谱图像^[8]。

2 融合算法

采用引导滤波器对多光谱图像进行插值, 充分考虑了多光谱图像和全色图像的灰度关系; 又采用多级引导滤波器对待融合图像进行细节提取, 充分考虑了图像间的关系, 有利于图像的有效融合; 最后, 根据改进的分水岭算法对图像进行区域划分的结果逐区域进行融合, 保证了图像各个区域固有的特征。

2.1 分水岭分割算法

一幅图像通常包含许多不同类型的地物, 如植被、建筑和河流等。这些地物图像往往具有不同的纹理, 因此图像融合的一个重要步骤就是将图像进行分割, 再以分割出来的子图像作为基本组成成分对图像进行融合。所以图像的有效分割对图像融合具有很大意义。

目前, 有多种图像分割的算法, 其中较为常用是 VINCENT 和 SOILLE 提出的一种模拟沉浸的分水岭分割算法, 其基本思想是: 如果把一副图像看作一个地形曲面, 那么图像中每个像素的值就是地形中的海拔高度, 表示该点在地形中的海拔; 如果在每个区域最小海

波高度处打个洞, 使水从小洞开始由低到高上升进而淹没整个地形。当处于不同盆地中的水即将要汇合在一起时, 修建一个大坝来阻止其汇合, 此时得到的水坝边界就是分水岭分割线; 水位的不断上升, 最后水完全淹没了各个盆地(目标地物), 但同时又被各个堤坝(分水岭)分割开来, 实现粘连物体分割的目的^[9]。

传统的分水岭分割具有能够准确定位边缘、易于提取地物的轮廓且算法简单等优点, 但同时具有对图像中的噪声极为敏感、容易产生过度分割等缺点。针对这些缺点, 参考文献[10]中提出了一种基于标记阈值的分水岭分割新算法, 该方案能抑制传统算法中的过度分割, 且边缘定位准确。具体算法参见参考文献[10]。图 1 为原图像、传统分水岭分割结果图和文献分割结果图。

2.2 局部相关系数

图像中每一个区域的所有像素点之间有很大的相关性, 该区域所有像素点共同表现出了该区域的局部特征^[1]。在多光谱与全色图像进行融合时, 如果两幅图像某区域之间低频部分的局部相关系数较大, 则两幅图像对应区域存在相似的光谱特征, 用全色图像的细节信息替换多光谱图像的细节信息既能充分提高空间分辨率, 又不会出现严重失真的情况; 相反, 如果某一区域间低频部分的局部相关系数太小, 说明该区域位置上两幅图像的光谱特征相差较大, 则不能直接进行替换^[1], 要根据成像系统特征对全色图像高频系数做适当的调整再替换。局部相关系数的计算公式如下^[11]:

$$C_{LCCS}(r) = \sigma_{M,P}(r) / \sqrt{\sigma_M(r)\sigma_P(r)} \quad (9)$$

式中, $\sigma_{M,P}(r)$ 是 M 和 P 两幅图像中对应的第 r 个区域的局部协方差; $\sigma_M(r)$, $\sigma_P(r)$ 分别是图像 M 和 P 中对应的第 r 个区域的局部方差。

除了局部相关系数能够衡量图像之间的结构性, 还有一种新的指标来衡量图像之间的空间相似性——4 阶相关系数^[1]。4 阶相关系数是在相关系数基础上提出来的, 其计算公式如下^[12-13]:

$$C_{FOCC}(r) = \frac{1}{|\Omega_r|} \sum_{(m,n) \in \Omega_r} \{ [M(m,n) - \mu_M(r)]^2 \times [P(m,n) - \mu_P(r)]^2 \} \left\{ \sum_{(m,n) \in \Omega_r} [M(m,n) - \mu_M(r)]^4 \sum_{(m,n) \in \Omega_r} [P(m,n) - \mu_P(r)]^4 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中, Ω_r 表示 r 个区域, $|\Omega_r|$ 是第 r 个区域的像素个数, $\mu_M(r)$ 和 $\mu_P(r)$ 分别表示 M 和 P 在对应的第 r 个区域内的像素均值。由于多光谱图像是在有限的波段范围内, 插入的高频细节可能导致部分融合系数没有在

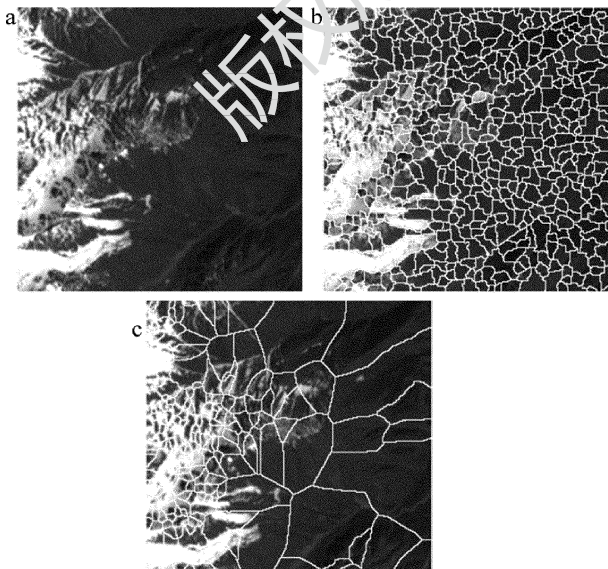


Fig. 1 a—the original image b—the traditional watershed segmentation image c—segmentation image of document

多光谱图像的波长范围内,这样融合结果会出现严重的光谱失真。为了更好地用全色图像中的细节信息替换多光谱图像的细节信息,比较图像每一区域的局部相关系数与 4 阶相关系数的大小从而决定细节信息是否替换^[3]。

2.3 算法实现

融合算法的步骤如下。

(1)对全色图像 P 进行降质,取与多光谱图像对应像素点的均值为降质全色图像该像素点的值。

(2)对多光谱图像插值得和 P 大小一致为 $256\text{pixel} \times 256\text{pixel}$ 的插值后多光谱图像 M_h (h 代表的是多光谱图像 M 的波段序号),采用引导滤波器以得到降质全色图像与原多光谱图像的线性关系,假设全色图像和插值后的多光谱图像也存在这种关系,从而得到插值后的多光谱图像,这里取 5×5 的方形窗口,取正则化参量 $\varepsilon = 10^{-6}$ 。

(3)采用改进的分水岭算法对 P 进行区域划分,并将区域划分结果映射至图像 M_h 。

(4)对 P 和 M_h 图像分别进行 2 级引导滤波,分别得到引导滤波输出 $P_2, M_{h,2}$ 和细节层 $P_{d,j}, M_{h,d,j}, j = 1,$

2,方形窗口和正则化参量的大小同步骤(2)。

(5)根据步骤(3)中划分结果计算 P_2 和 $M_{h,2}$ 中第 r 个区域的 LCCS 值 $C_{LCCS}(r)$ 和 FOCC 值 $C_{FOCC}(r)$,如果 $C_{LCCS}(r) > C_{FOCC}(r)$,表示 P 和 M_h 区域之间的局部特征存在很大相关性,则用 P 在该区域的细节信息替换 M_h 区域的细节信息且不会产生光谱扭曲。反之,保持 M_h 区域的细节信息不变。则融合后的细节信息图像 $F_{h,d,j,r}$ 第 r 区域的细节信息计算公式如下^[1]:

$$F_{h,d,j,r}(m,n) = \begin{cases} P_{d,j,r}(m,n), & (C_{LCCS}(r) > C_{FOCC}(r)) \\ M_{h,d,j,r}(m,n), & (C_{LCCS}(r) \leq C_{FOCC}(r)) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $F_{h,d,j,r}(m,n)$ 表示 M_h 融合后的细节信息图像在第 r 区域中点 (m,n) 处的第 j 级细节信息, $P_{d,j,r}(m,n)$ 表示 P 在第 r 区域中点 (m,n) 处的第 j 级细节信息, $M_{h,d,j,r}(m,n)$ 表示 M_h 图像在第 r 区域中点 (m,n) 处的第 j 级细节信息。

(6)用 $F_{h,d,j,r}(m,n)$ 替换 $M_{h,d,j,r}(m,n)$,得到最终融合图像 $F_h = M_{h,2} + \sum_{j=1}^2 F_{h,d,j}$ 。

该方法的融合步骤流程图如图 2 所示。

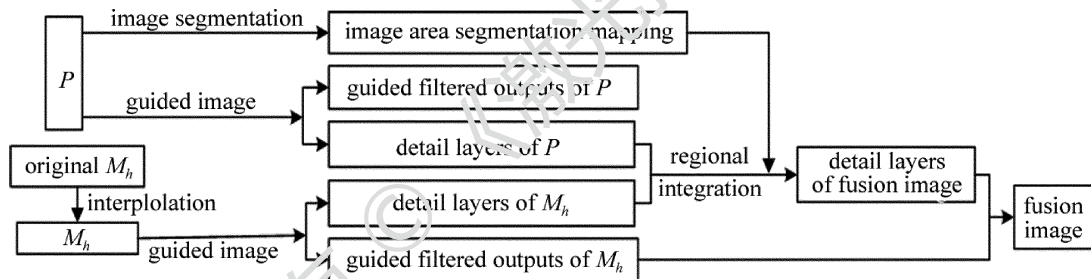


Fig. 2 Process flow of the fusion algorithm

3 实验结果和分析

为了评价本文中算法的性能,作者选取两组 Landsat 7 遥感图像作为测试对象,分别用本文中算法、NSCT 融合算法、参考文献[3]以及参考文献[4]中的融合方法对图像进行融合测试,通过主观评价和客观评价指标对融合效果进行分析对比。

本文中选取平均梯度 G 、标准差 S 、相关系数 C 和光谱扭曲程度 D 以及算法的运行时间作为客观评价指标。平均梯度 G 表征的是图像细节特征的清晰程度,平均梯度越大表示图像的细节信息越丰富,空间分辨率就越高,其表达式为:

$$G = \frac{1}{QN} \sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{\Delta F_x^2(m,n) + \Delta F_y^2(m,n)}{2}} \quad (12)$$

式中, ΔF_x 和 ΔF_y 分别表示图像 F 在水平方向和垂直

方向的差分, Q 和 N 分别代表的是图像的行列数;标准差越大图像的对比度就越大,图像目视效果越好。

$$S = \sqrt{\frac{1}{QN} \sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^N [I(m,n) - \mu]^2} \quad (13)$$

$$I(m,n) = \frac{F(m,n) - \min(F(m,n))}{\max(F(m,n)) - \min(F(m,n))} \times 255 \quad (14)$$

相关系数体现了融合图像保持光谱特性的能力,其值越大,光谱失真越小,融合效果越好:

$$C(F,I) = \frac{\sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^N \{ [F(m,n) - \bar{F}] \times [M(m,n) - \bar{M}] \}}{\sqrt{\sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^N [F(m,n) - \bar{F}]^2 \sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^N [M(m,n) - \bar{M}]^2}} \quad (15)$$

式中, $F(m,n), M(m,n)$ 分别为融合图像和原始图像的灰度值, \bar{F}, \bar{M} 分别为其均值;光谱扭曲程度为:

$$D(F, M) = \frac{1}{QN} \sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^N |F(m, n) - M(m, n)| \quad (16)$$

光谱扭曲程度 $D(F, M)$ 越大, 则说明图像失真越严重^[14-15]。

图 3 中给出了第 1 组细节较多的实验原图像和各融合后得到的图像。图 3a、图 3b 分别是全色图像、插值后的多光谱图像, 其图像大小为 256×256 ; 图 3c 为 NSCT 算法的融合结果; 图 3d 为参考文献[1]中算法的融合结果; 图 3e 为参考文献[4]中算法的融合结果; 图 3f 为本文中算法的融合结果。从主观方面上来看, 图 3c 中出现了严重的光谱扭曲; 图 3e 中的视觉效果较为模糊; 图 3d 和图 3f 中的纹理及边缘效果较好。

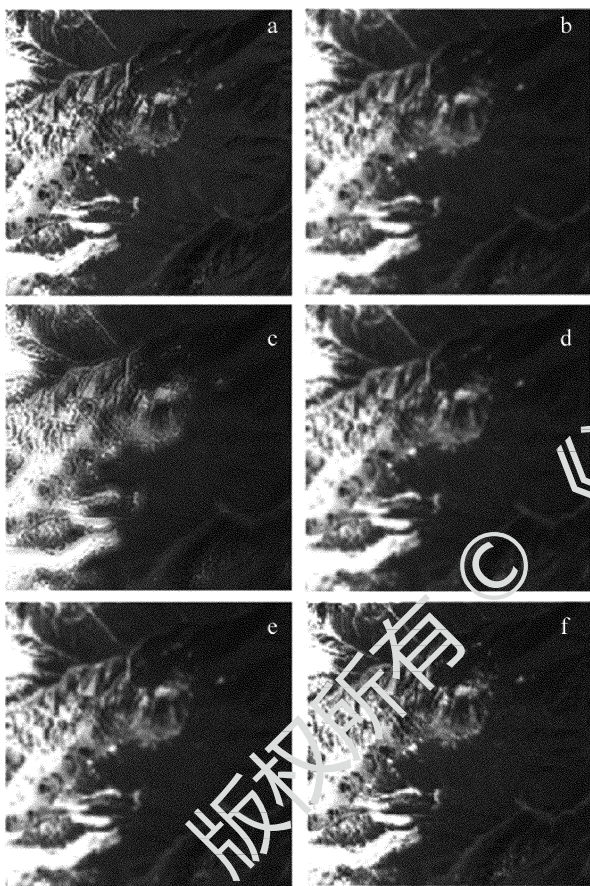


Fig. 3 Original image and fusion image of experiment 1

a—panchromatic image b—multispectral image c—NSCT algorithm
d—algorithm of reference[1] e—algorithm of reference[4] f—algorithm of this paper

Table 1 Objective evaluation index of image fusion experiment of group 1

fusion algorithm	the average gradient	standard deviation	correlation coefficient	spectral distortions	the elapsed time/s
NSCT algorithm	3.183	28.339	0.9675	3.342	99.07
algorithm of reference[1]	3.015	16.655	0.9715	2.476	138.2
algorithm of reference[4]	3.102	24.996	0.9772	3.275	154.41
algorithm of this paper	3.171	29.572	0.9857	2.386	141.63

表 1 中为第 1 组图像融合实验的客观评价指标, 本文中算法得到的平均梯度、标准差、相关系数、光谱扭曲程度和运算时间均优于参考文献[4], 说明本文中算法在增强多光谱图像的细节信息方面比较好, 同时在保留光谱信息方面优于对比算法且算法运算复杂度低。相对于 NSCT 算法, 本文中算法得到的标准差、相关系数和光谱扭曲程度均优于 NSCT 算法, 但是平均梯度略差且运算时间较长, 这是由于 NSCT 算法中将多光谱图像的细节信息全部用全色图像的细节信息替换, 不需要对全色图像和多光谱图像的对应细节信息进行区域比较, 所以 NSCT 算法运算时间较短且平均梯度值较大但光谱扭曲程度也很大。本文中算法得到的平均梯度、相关系数、标准差和光谱扭曲程度均优于参考文献[1], 运算时间相对于参考文献[1]较长, 但是相差不大, 这是因为参考文献[1]中算法对图像进行划分的区域较少且融合准则较简单, 所以参考文献[1]中算法的运算时间较短。结合主观和客观评价, 本文中算法相对于对比算法效果较好。

图 4 为第 2 组图像实验中的各融合图, 表 2 为第 2 组图像融合实验的客观评价指标。从图 4 和表 2 可

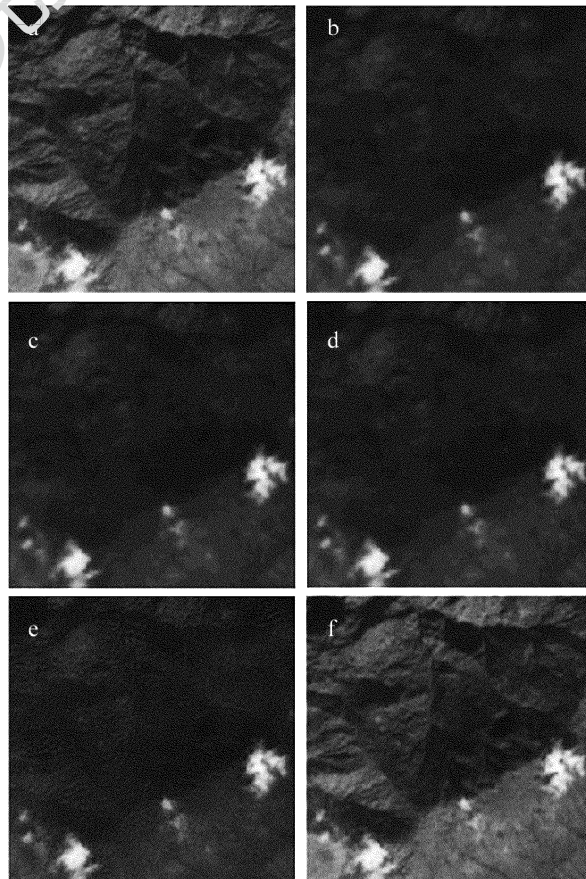


Fig. 4 Original image and fusion image of experiment 2

a—panchromatic image b—multispectral image c—NSCT algorithm
d—algorithm of reference[1] e—algorithm of reference[4] f—algorithm of this paper

Table 2 Objective evaluation specifications of image fusion experiment of group 2

fusion algorithm	the average gradient	standard deviation	correlation coefficient	spectral distortions	the elapsed time/s
NSCT algorithm	2.857	18.237	0.9503	3.342	96.32
algorithm of reference[1]	2.742	14.752	0.9635	2.476	127.84
algorithm of reference[4]	2.786	17.772	0.9664	3.275	143.22
algorithm of this paper	2.831	18.132	0.9671	2.386	137.51

以再一次看出,相对其它几种融合算法,本文中算法得到的融合图像更具有优越性。

由于空间分辨率和光谱分辨率是互相矛盾的,多光谱图像和全色图像融合尽可能提高空间分辨率的同时应避免过多的光谱损失^[15-16],因此,结合增强细节与光谱保留两个方面综合权衡及由以上 2 组图像融合实验可知,本文中提出的算法在一定程度上具有有效性和优越性。

4 结 论

提出了基于多级引导滤波器的区域融合方法,该方法充分考虑了多光谱图像插值的重要性,采用引导滤波器建立降质的全色图像与多光谱图像的关系,进而对多光谱图像进行插值。实验评价指标显示,此方法在保留多光谱图像的光谱信息方面,优于 NSCT 算法、参考文献[1]中算法和参考文献[4]中算法;在提高细节信息方面,优于参考文献[1]中算法和参考文献中[4]中算法,很好地提高了融合图像的几何分辨率。本文中算法只针对静止图像,对于连续的视频图像,本文中算法还能否达到很好的融合效果,后面将做进一步研究。

参 考 文 献

[1] TAO X T, HE H J, CHEN F, *et al.* Pan-sharpening algorithm for remote sensing images based on local correlation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 03100031(in Chinese).
 [2] DO M N, VETTERLI M. Contourlet: A directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*,

2002, 14(12): 357-360.
 [3] CUNHA A L, ZHOU J, DO M N. The nonsubsamped contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
 [4] YE Ch Q, WANG B Sh, MIAO Q G. Fusion algorithm of multispectral and high-resolution images based on region feature in NSCT domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1240-1247 (in Chinese).
 [5] MAHYARI A G, YAZDI M. Panchromatic and multispectral image fusion based on maximization of both spectral and spatial similarities [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 1976-1985.
 [6] HUO J T, NA Y. Fusion algorithm of multispectral and panchromatic images based on unsampled contourlet transform[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(3): 282-284(in Chinese).
 [7] MA Y J, SHI A Y, XU L Zh. Fusion remote sensing images using region-based selection operator [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(2): 228-233(in Chinese).
 [8] HE K, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
 [9] WANG J L, HE X J, SONG K F. Image fusion algorithm of multispectral and panchromatic images adopting region mutual information [J]. *Laser and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2757-2764 (in Chinese).
 [10] GUAN XI P, HUANG N, TANG Y G. New watershed segmentation algorithm via marker threshold[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4): 972-975(in Chinese).
 [11] CHOI J, YU K, KIM Y. A new adaptive component-substitution based satellite image fusion by using partial replacement [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 295-309.
 [12] GAO Y, WANG A M, WANG F H, *et al.* Application of improved wavelet transform algorithm in image fusion[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 690-695 (in Chinese).
 [13] ZHANG J P, QI CHEN, TANG W Y. Multi-sensor image fusion based on transfer able parameters[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008, 2(1): II1096-II1099.
 [14] CHEN F, ZHANG W W, YU W J, *et al.* Fusion algorithm of EMC-CD's low-light level image based on wavelet transform [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 155-160 (in Chinese).
 [15] ZHOU Zh Q, PENG S L, WANG B. An optimized approach for pansharpening very high resolution multispectral[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 735-739.
 [16] WANG W Q, JIAO L Ch, YANG Sh Y. Fusion of multispectral and panchromatic images via sparse representation and local autoregressive model[J]. *Information Fusion*, 2014, 20(5): 73-87.