

采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法

王金玲, 贺小军, 宋克非

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高多光谱与全色图像融合算法质量, 提出了一种采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法。首先将多光谱图像变换至 HSV 彩色空间, 并采用分水岭与区域合并的方法对 V 分量进行区域分割, 得到区域分割映射, 欧氏光谱距离作为区域合并的测度。然后采用非下采样 Contourlet 变换(Nonsubsample Contourlet Transform, NSCT)对多光谱图像 V 分量和全色图像进行多分辨率分解, 将区域分割结果映射至全色图像, 通过计算对应区域间的互信息对多分辨率分解系数进行融合, 获得融合图像的分解系数, 最后通过 NSCT 反变换实现融合图像重构。图像融合算法对比实验表明, 文中融合算法在充分保留了多光谱图像光谱信息的同时, 尽可能多地注入了全色图像的细节信息, 有效提高了多光谱图像的边缘特征。

关键词: 图像融合; 图像分割; 非下采样 Contourlet 变换; 区域互信息

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2757-08

Image fusion algorithm of multi-spectral and panchromatic images adopting region mutual information

Wang Jinling, He Xiaojun, Song Kefei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For advancing the fusion algorithm quality of multi-spectral and panchromatic images, an image fusion algorithm of multi-spectral and panchromatic images was presented by region mutual information. Firstly the multi-spectral image was turned to HSV color space, and region segmentation was applied to V component by the method of watershed and region combination, and spectral distance was taken as the region combination estimation. Secondly the V component of multi-spectral image and panchromatic image were decomposed multi-resolution by nonsubsample Contourlet transform(NSCT), the region segmentation was mapping to the panchromatic image, and the multi-resolution decomposition coefficient was fused by calculating the mutual information of corresponding region to obtain the decomposition coefficient of fusion image. Lastly the fusion image reconfiguration was realized through NSCT inverse transform. The experimental result shows that the image fusion algorithm presented by this paper retains the spectral information of multi-spectral image adequately, meanwhile injects details information of panchromatic image as much as possible, which advances the edge characteristic of multi-spectral image effectively.

收稿日期: 2013-12-03; 修订日期: 2014-01-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA12Z113)

作者简介: 王金玲(1983-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事遥感图像处理的研究。Email:winnie_wjl@hotmail.com

Key words: image fusion; image segment; nonsubsample Contourlet transform; region mutual information

0 引言

航天遥感图像传感器的多样性发展,为通过多源传感器图像融合实现对某场景图像的恢复、重构和解释提供了有力的支持。多源传感器图像融合包括同一传感器上的多波段融合、多时相融合以及不同传感器之间的图像融合等。多光谱遥感图像是通过探测地物在多个不连续的光谱波段范围内的辐射能量所形成的图像,其光谱分辨率为 100~200 nm。多光谱图像包含了地物丰富的光谱信息,其具有较高的光谱分辨率,但是多光谱图像一般空间分辨率较低,图像细节信息较少,而全色图像的空间分辨率较高,具有较多的地物细节特征,但是其光谱分辨率较低,因此将多光谱图像与全色图像进行融合,所得融合图像同时具有较高的光谱分辨率和空间分辨率,为地物识别与分类等应用提供详细、准确的图像数据^[1]。

多光谱与全色图像融合算法大致可分为两类:基于彩色空间分量替换的融合方法和基于多分辨率分析的融合方法。基于彩色空间分量替换的融合方法首先将多光谱图像变换至灰度彩色空间,然后采用全色图像替代其亮度分量,主要包括 HIS 变换法^[2]和 PCA^[3]主成份分析法。根据 Piella 框架,基于多分辨率分析的融合方法首先对多光谱图像和全色图像分别进行多分辨率分解,然后对分解系数进行融合处理,再经过多分辨率重构得到融合图像^[4]。多分辨率变换工具包括小波变换、金字塔变换、Curvelet 变换、Contourlet 变换及 NSCT 变换等。NSCT 变换是在其他变换基础上提出的,改善了小波变换对线奇异或面奇异信号描述的限制性、金字塔变换各层次间

的冗余性等缺陷,增加了多方向分解,并取消了图像分解和重构中的上采样及下采样过程,令分解系数具有平移不变性等优点。基于多分辨率分析的融合规则的制定包括采用像素最大值、像素加权平均、局部均值、局部能量、区域均值和区域均值等。

文中提出一种采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法,该算法选择 NSCT 变换作为多分辨率分析工具,采用分水岭与欧氏光谱距离相结合的方法将多光谱图像的亮度分量进行区域划分,然后根据各区域的互信息特征制定各区域多分辨率分解系数的融合规则,最后对融合系数进行重构及彩色空间变换,得到最终融合图像。实验结果表明,该算法能够有效区分多光谱图像的不同光谱特征区域,融合图像保留了多光谱图像的光谱特征,并充分融合全色图像的细节信息,具有较好的目标辨识能力和光谱分析价值。

1 NSCT 变换

在 Contourlet 变换基础上,Cunha A.L.等人提出了非下采样 Contourlet 变换(Nonsampled Contourlet Transform, NSCT),该变换取消了图像分解和重构中的上采样和下采样过程,因此具有平移不变性。非下采样 Contourlet 变换具备的平移不变性能够有效降低配准误差对融合性能的影响。由于图像经 NSCT 分解后得到的各子带图像与源图像具有相同的尺寸,因此更容易找到各子带图像之间的对应关系,从而有利于融合规则的制定。因此,NSCT 更适合图像融合。

NSCT 分解结构图如图 1 所示^[5]。NSCT 可分解为

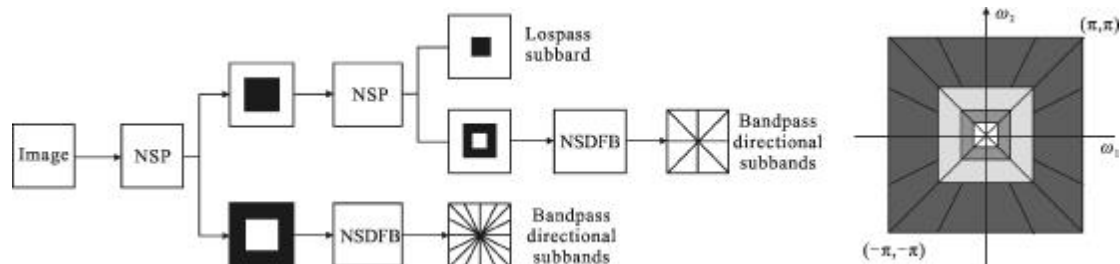


图 1 NSCT 分解结构图

Fig.1 Decomposition structural drawing of NSCT

两个具有平移不变性的部分:(1) 非下采样金字塔 (Nonsampled Pyramid, NSP)分解,保证 NSCT 的多尺度分解特性。(2) 非下采样的方向滤波器组 (Nonsampled Directional Filter Bank, NSDFB), 保证 NSCT 变换的多方向分解特性。NSCT 的理想频域划分示意图如图 1 所示。

2 融合算法

2.1 融合思想

多光谱与全色图像经过 NSCT 分解后, 分别得到各自的低频系数和各级高频系数。低频子带系数表征了源图像的背景信息或光谱信息, 高频子带系数则表征了图像中目标的空间细节信息和边缘特

征, 选取合适的系数融合规则决定了最终的融合质量。系数融合规则包括像素级、窗口级和区域级三种。图像中的目标特征并不能由单个像素或者具有固定尺寸的窗口完全表征, 而是需要由具有相关性的像素集合来表征, 基于像素和窗口的融合规则虽然能充分融合源图像的细节信息, 但忽略了像素或窗口间的相关性, 从而具有一定的局限性。而基于区域的融合规则首先将源图像划分为具有实际意义的目标区域和背景区域, 然后进行融合, 能够同时有效降低噪声和配准精度对融合结果的影响, 并且在融合图像中充分保留源图像中的目标特征。因此, 文中提出了一种采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法, 该算法的融合思想框图如图 2 所示。

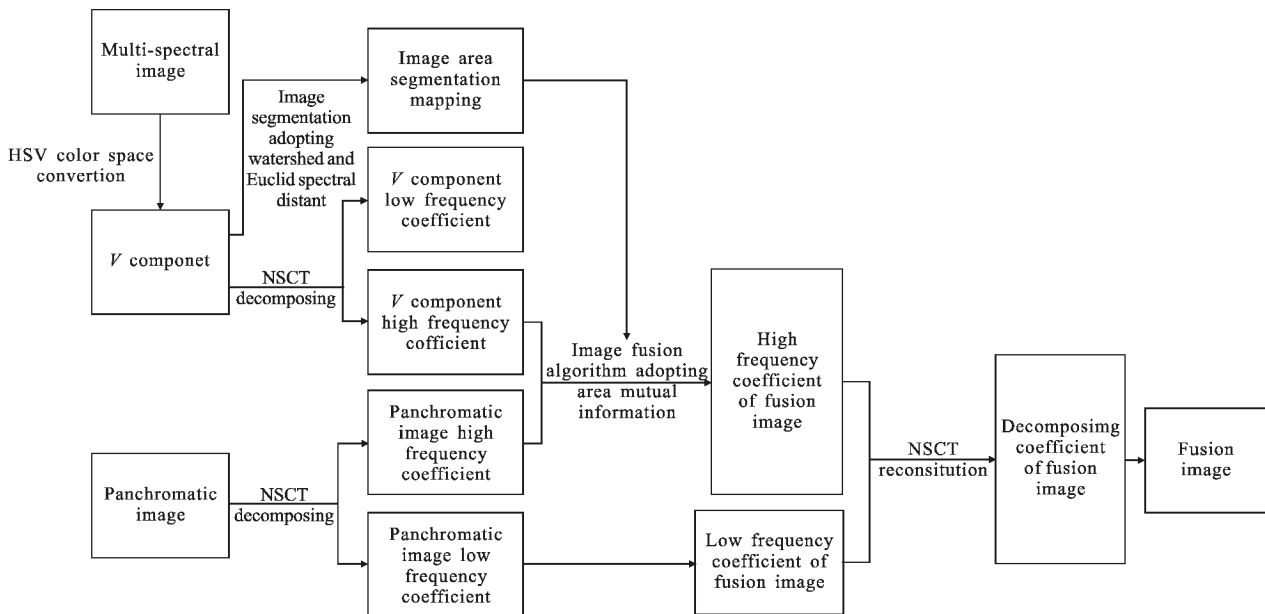


图 2 文中融合算法框图

Fig.2 Fusion algorithm diagram of this paper

采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法首先对多光谱图像各谱段进行双线性插值, 获得与全色图像具有相同像元尺寸的多光谱图像, 将多光谱图像变换至 HSV 彩色空间, 并对 V 分量进行区域分割, 获得区域映射图 MS_SEG。然后采用 NSCT 分解多光谱图像 V 分量和全色图像, 得到低频系数和各级高频系数。根据区域映射图计算各阶系数的区域互信息, 分别融合对应区域的低频系数和高频系数, 对融合系数进行 NSCT 反变换得到融合多光谱图像的 V 分量。最后将融合图像还原至 RGB 彩色空间即得到最终融合图像。

2.2 多光谱图像分割

基于区域的融合规则的制定首先需要具备融合图像之间的区域映射图。对于多光谱与全色图像融合, 则需要对源图像进行适当分割。全色图像具有丰富的图像边缘信息, 若对全色图像进行分割则会产生许多细小区域, 而部分细小区域并不具备实际意义。多光谱与全色图像融合的目的是保留多光谱图像的光谱分辨率同时, 尽量充分的注入全色图像的细节信息, 因此对多光谱图像进行分割, 能够获得对融合规则制定更具有实际意义的区域映射图。文中首先将多光谱图像变换至 HSV 彩色空间, 然后对 V

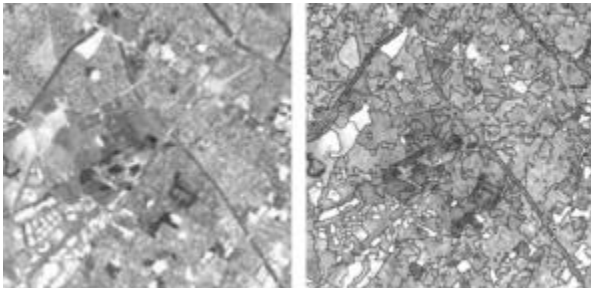
分量进行有效分割获得区域映射图。

图像分割的方法有很多,分割结果越精确方法越复杂。对于图像融合用的图像分割,只需要基本区分源图像中目标与背景区域即可,不需要获取目标的精确边缘。由于基于分水岭的图像分割方法是一种自适应的多阈值图像分割算法,它具有运算简单、能够较好地提取目标轮廓等优点,文中采用分水岭方法对多光谱图像 V 分量进行分割。但由于源图像噪声等因素影响,分割结果仍会出现细小区域,这些

$$\Delta E(R_{A,B}) = \sqrt{\frac{(\overline{R}(R_A) - \overline{R}(R_B))^2}{R^2} + \frac{(\overline{G}(R_A) - \overline{G}(R_B))^2}{G^2} + \frac{(\overline{B}(R_A) - \overline{B}(R_B))^2}{B^2}} \quad (2)$$

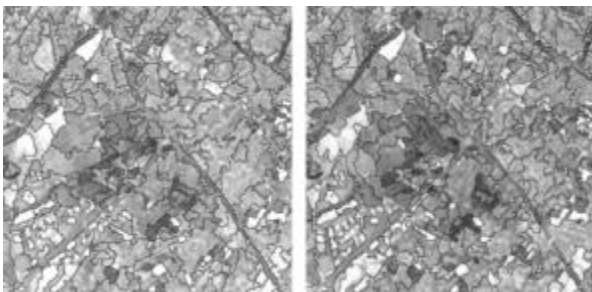
式中: $\overline{R}(R_L)$ 、 $\overline{G}(R_L)$ 、 $\overline{B}(R_L)$ 分别为区域 R_L 内的 RGB 波段的图像均值 ($L=A, B$); \overline{R} 、 \overline{G} 、 \overline{B} 分别为 RGB 波段的均值; $\Delta E(R_{A,B})$ 为相邻区域 R_A 和 R_B 之间的光谱欧氏距离; $\Delta E(R_{A,B})$ 值越大,表明相邻区域之间的光谱差异越大,不能进行区域合并,反之 $\Delta E(R_{A,B})$ 值越小,则表明相邻区域之间的光谱越相似,可以进行区域合并。

图 3 中的 (a) 为原始多光谱图像, (b) 为采用分水



(a) 原始多光谱图像 (b) 分水岭分割结果

(a) Original multi-spectral image (b) Watershed segmentation result



(c) 光谱欧氏距离区域合并结果 (d) 分割后多光谱图像
(c) Region merging result of Euclid distant (d) Segmented multi-spectral image

图 3 多光谱图像分割实验

Fig.3 Segmentation experiment of multi-spectral image

区域不具备实际意义,可以与相邻区域进行合并^[6],文中采用欧氏光谱距离衡量区域间相似程度来合并相邻区域,以得到最终的区域映射图。

欧氏光谱距离定义如公式(1)所示。

$$\Delta E = \sqrt{(R_A - R_B)^2 + (G_A - G_B)^2 + (B_A - B_B)^2} \quad (1)$$

式中: R_A 、 G_A 、 B_A 分别为多光谱图像某像素点 A 的 RGB 值; R_B 、 G_B 、 B_B 分别为像素点 B 的 RGB 值; ΔE 为两像素点之间的欧氏距离。根据公式(1),定义两区域之间的光谱欧氏距离如公式(2)所示。

岭分割方法对其 V 分量进行分割的结果,从图中可以看出,由于受到噪声等因素影响,分割结果出现很多细小区域,这不仅增加图像融合的工作量,同时也不具有实际意义。图(c)为采用光谱欧氏距离进行区域合并的结果,分割后的多光谱图像不仅有效分割了图像中的具有不同光谱特征的区域,并尽量避免了无实际意义区域的分割。

对多光谱图像进行预分割处理,不仅能够简化多光谱与全色图像的融合处理,同时能够分别考虑多光谱各区域的光谱信息与全色图像对应区域细节信息之间的关系,对多光谱各区域注入不同程度的全色图像,从而能够较好地保持多光谱图像的光谱信息,并同时增加其空间分辨率。因此,多光谱图像的合理分割,是基于区域的多光谱图像与全色图像融合质量的保证。

2.3 低频系数融合规则

多光谱图像 V 分量与全色图像经过 NSCT 分解后,得到低频系数和各阶高频系数。

低频系数主要包含了图像的背景灰度特征和部分光谱信息,为了充分保留多光谱图像光谱信息,低频子带系数选择多光谱图像 V 分量的低频子带系数,融合规则可用公式(3)表示:

$$C_{l_f}^{(1)} = C_{MS}^{(1)} \quad (3)$$

2.4 高频系数融合规则

高频系数反映了图像的细节信息,基于充分保留多光谱图像光谱特征,并尽可能多注入全色图像细节信息的融合思想,文中采用区域互信息量(Region Mutual Information, RMI) 和区域结构系数制定高频系数融合规则。根据信息论中互信息量概念,区域 R_i

互信息量如公式(4)所示。

$$RMI(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) = I(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i)) + I(C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) - I(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) \quad (4)$$

式中: $RMI(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i))$ 为多光谱图像 V 分量和全色图像在区域 R_i 内 s 阶 d 方向高频子带系数的区域互信息量。 $I(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i))$ 表示多光谱图像的信息熵, 如公式(5)所示。 $I(C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i))$ 表示全色图像的信息熵, 如公式(6)所示。 $I(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i))$ 为多光谱图像和全色图像在区域 R_i 内的联合信息熵, 如公式(7)所示。

$$I(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i)) = - \sum_{(x,y) \in R_i} p(C_{MS}^{\{s,d\}}(x,y)) \log p(C_{MS}^{\{s,d\}}(x,y)) \quad (5)$$

$$I(C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) = - \sum_{(x,y) \in R_i} p(C_{PAN}^{\{s,d\}}(x,y)) \log p(C_{PAN}^{\{s,d\}}(x,y)) \quad (6)$$

$$I(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) = - \sum_{(x,y) \in R_i} p(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) \times \log p(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) \quad (7)$$

区域互信息量表征了多光谱图像和全色图像在区域 R_i 内的信息相关程度, 其值越大, 表明两幅图像相关性越大, 说明多光谱图像与全色图像在 R_i 区

域空间细节分量相似度较大。

区域结构测度如公式(8)所示。

$$RCS_{C_L^{\{s,d\}}(R_i)} = \frac{\sigma_{C_L^{\{s,d\}}(R_i)}}{\mu_{C_L^{\{s,d\}}(R_i)}} \quad s=2,3,4 \quad d=1,2,\dots,8 \quad (8)$$

式中: $\sigma_{C_L^{\{s,d\}}(R_i)}$ 为红外或可见光图像在 R_i 区域内 s 阶 d 方向高频子带系数的方差; $\mu_{C_L^{\{s,d\}}(R_i)}$ 为对应的均值。 $RCS_{C_L^{\{s,d\}}(R_i)}$ 值越大, 表明 R_i 区域内细节信息越多, 边缘特征越明显。

因此, 当区域互信息量大于某阈值时, 为了充分保留多光谱图像的光谱特征, 融合图像的高频子带系数等于该区域的多光谱图像高频子带系数。反之, 当区域互信息量小于某阈值时, 说明多光谱图像在该区域具有较少的空间细节信息, 采用区域结构系数将全色图像空间细节信息注入至多光谱图像中。当区域互信息量小于某阈值时, 取区域结构系数值大的高频子带系数作为融合图像在该区域的高频子带系数。

综上所述, 高频子带系数融合规则如公式(9)所示。

$$C_{I_f}^{\{s,d\}}(R_i) = \begin{cases} C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i) & \text{如果 } RMI(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) \geq T \\ C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i) & \text{如果 } RMI(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) < T \text{ 同时 } RCS_{C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)} \geq RCS_{C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i)} \\ C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i) & \text{如果 } RMI(C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i), C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)) < T \text{ 同时 } RCS_{C_{PAN}^{\{s,d\}}(R_i)} < RCS_{C_{MS}^{\{s,d\}}(R_i)} \end{cases} \quad (9)$$

3 实验结果与分析

为了验证采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法 NSCT_SEG_MI 的融合性能和融合图像质量, 作者进行了大量图像融合实验, 现选取其中两组进行说明。实验同时采用基于像素的图像融合算法(NSCT_PIX_MAX)、基于区域能量的图像融合算法(NSCT_REG_EN)以及基于区域均值比的图像融合算法(NSCT_REG_RM)与文中算法进行对比。对比算法均采用 HSV 彩色空间和 NSCT 变换, 低频系数融合均采用多光谱图像的低频系数, NSCT_PIX_MAX 算法的高频系数采用取最大方法, NSCT_REG_EN 算法的高频系数采用区域能量均值取最大值法, NSCT_REG_RM^[8]算法的高频系数采用区域均值比取最大值法。文中采用 Q 评价算子^[9]、平均梯度、相

关系数(CC)、光谱扭曲度(DD)^[10]作为融合图像的客观评价指标。Q 评价算子值和平均梯度值越大, 表明融合图像边缘特征越显著, 几何分辨率越高。CC 值越大和 DD 值越小表明融合图像与原始图像光谱特征越相似, 光谱失真越小。

第一组融合实验的源图像及各算法融合图像如图4所示。从图中可以看出, 全色图像细节特征显著, 多光谱图像具有丰富的光谱信息。从4种算法的融合图像可以看出, NSCT_PIX_MAX 和 NSCT_SEG_MI 具有丰富的边缘信息, 但 NSCT_PIX_MAX 算法光谱失真最为严重, NSCT_REG_EN 算法边缘模糊, NSCT_REG_RM 算法图像边缘较 NSCT_REG_EN 清晰, 但光谱失真较 NSCT_REG_EN 严重。表1为第一组融合实验的客观评价指标, 从表中可以证明, NSCT_SEG_MI 算法光谱失真度最小, 从全色图像获取的细节特征最丰富。

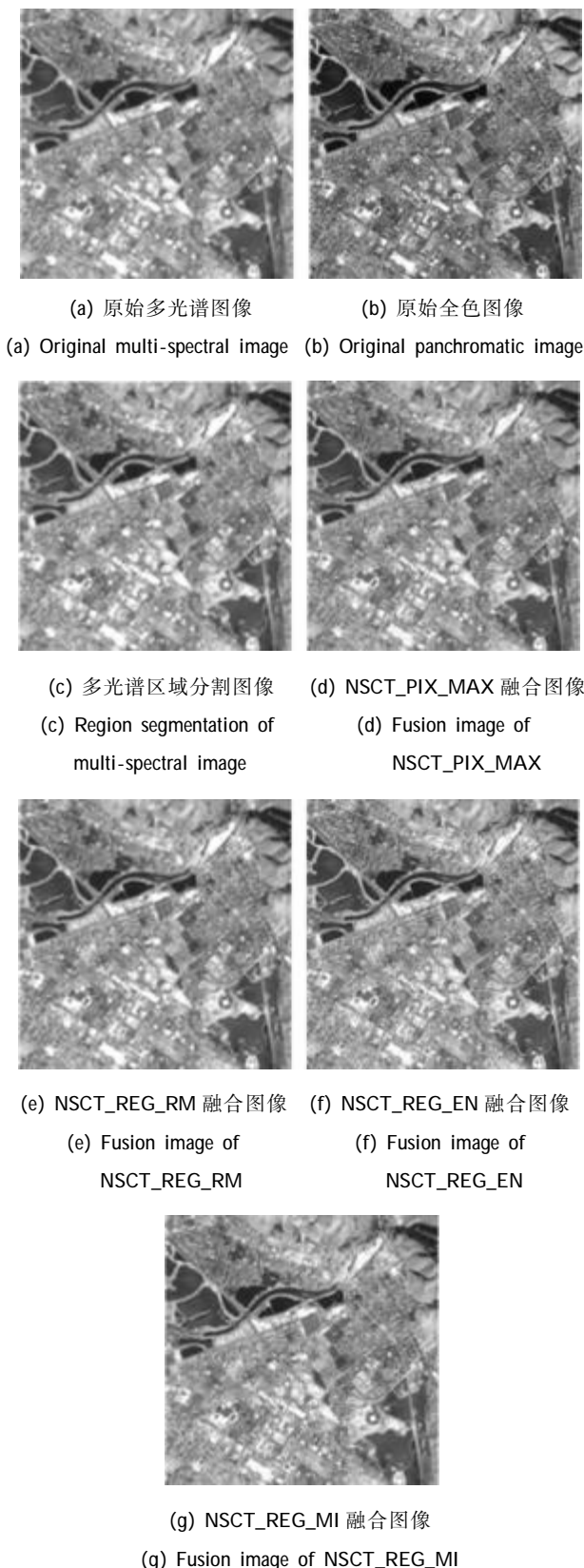


图 4 第一组多光谱与全色图像融合实验

Fig.4 First image fusion experiment of multi-spectral and panchromatic images

表 1 第 1 组图像融合实验客观评价指标

Tab.1 Objective evaluation index of first image fusion experiment

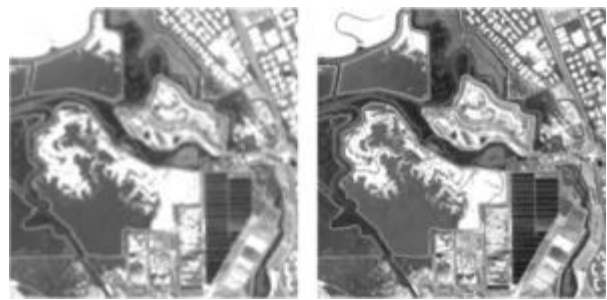
Algorithm		$Q(I_{ms}, I_{pan}, I_f)$	\bar{G}	CC	DD
NSCT_PIX_MAX	R	0.494 9	16.885 4	0.917 5	15.051 2
	G	0.453 5	17.543 3	0.893 4	16.388 2
	B	0.407 6	17.720 3	0.877 3	17.110 6
NSCT_REG_RM	R	0.409 5	11.839 1	0.934 6	12.970 7
	G	0.371 6	11.949 9	0.914 9	14.148 4
	B	0.340 4	11.766 6	0.901 7	14.787 7
NSCT_REG_EN	R	0.392 8	8.695 0	0.974 8	8.890 2
	G	0.358 1	8.301 0	0.967 0	9.783 0
	B	0.331 9	7.735 6	0.961 7	10.273 2
NSCT_REG_MI	R	0.580 6	18.416 0	0.994 9	3.087 4
	G	0.538 5	19.170 2	0.992 9	3.491 8
	B	0.488 1	19.391 7	0.991 3	3.726 5

表2 为第 2 组融合实验的客观评价指标,从表中可以再次证明,文中提出的 NSCT_SEG_MI 算法边缘特征最显著,与原始多光谱图像的光谱特征最为相似,光谱失真最小。第 2 组融合实验的源图像及各种算法融合图像如图 5 所示。从图中可以看出,NSCT_SEG_MI 算法最清晰的图像边缘,NSCT_PIX_MAX 算法的光谱失真最为严重,NSCT_REG_RM 算法的边缘最为模糊,而 NSCT_REG_EN 算法的边缘特征有所改善,但仍没有文中算法清晰。

表 2 第 2 组图像融合实验客观评价指标

Tab.2 Objective evaluation index of second image fusion experiment

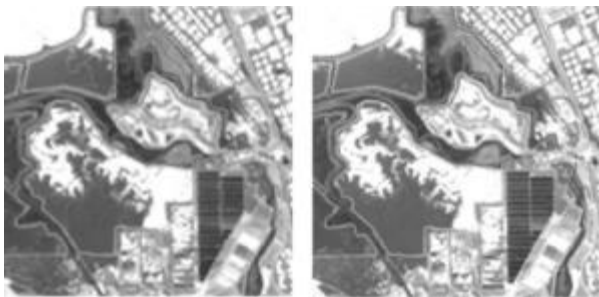
Algorithm		$Q(I_{ms}, I_{pan}, I_f)$	\bar{G}	CC	DD
NSCT_PIX_MAX	R	0.565 2	8.313 7	0.967 0	12.391 9
	G	0.524 0	8.838 5	0.968 5	11.988 6
	B	0.474 3	9.243 7	0.958 9	12.742 5
NSCT_REG_RM	R	0.533 9	7.217 8	0.975 2	9.969 2
	G	0.495 3	6.740 6	0.976 6	10.148 5
	B	0.441 9	6.037 9	0.969 4	10.642 3
NSCT_REG_EN	R	0.520 5	11.038 9	0.982 2	8.503 4
	G	0.485 2	10.768 2	0.983 9	8.630 4
	B	0.440 0	10.488 6	0.979 4	9.946 4
NSCT_REG_MI	R	0.629 4	11.959 4	0.997 6	2.523 5
	G	0.580 7	11.740 2	0.997 7	2.595 8
	B	0.515 4	11.518 4	0.996 7	2.793 1



(a) 原始多光谱图像

(b) 原始全色图像

(a) Original multi-spectral image (b) Original panchromatic image

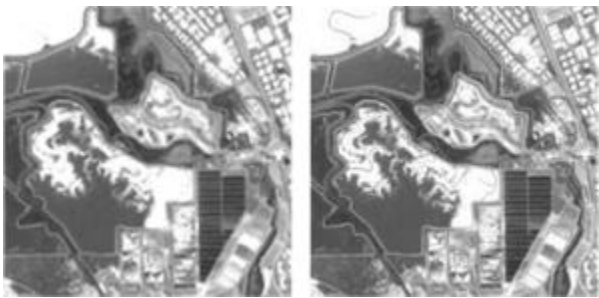


(c) 多光谱区域分割图像

(d) NSCT_PIX_MAX 融合图像

(c) Region segmentation of multi-spectral image

(d) Fusion image of NSCT_PIX_MAX



(e) NSCT_REG_RM 融合图像

(f) NSCT_REG_EN 融合图像

(e) Fusion image of NSCT_REG_RM

(f) Fusion image of NSCT_REG_EN



(g) NSCT_REG_MI 融合图像

(g) Fusion image of NSCT_REG_MI

图 5 第 2 组多光谱与全色图像融合实验

Fig.5 Second image fusion experiment of multi-spectral and panchromatic images

综合以上 2 组图像融合实验可知,文中提出的算法在充分保留原始多光谱图像的光谱信息的同时,尽可能多地注入了全色图像的细节信息,令融合图像的边缘特征更为显著。

4 结 论

针对同时提高多光谱与全色图像融合光谱分辨率和几何分辨率的问题,文中提出了一种采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法。算法首先将多光谱图像变换至 HSV 彩色空间,然后采用分水岭图像分割法对 V 分量进行初步分割,再根据各区域的欧氏光谱距离判断区域间是否有相似光谱特征,以进行区域合并,由此得到多光谱图像的区域分割。采用 NSCT 变换对多光谱图像 V 分量和全色图像进行多分辨率分解,将区域分割映射至全色图像,分别计算原始图像在对应区域的互信息特征,并以此进行分解系数融合,以获得融合图像的多分辨率分解系数,最后通过 NSCT 反变换,得到最终的融合图像。实验结果表明,文中提出的融合算法在充分保留多光谱图像的光谱特征的同时,尽可能多地注入了全色图像的边缘信息,提高了融合图像的几何分辨率。

参考文献:

- [1] Chen Dake. Fusion algorithms of multispectral and panchromatic images[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
陈大可. 多光谱与全色图像融合方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [2] Hu Youjian Zhang Xiaohua. An improved IHS fusion for high resolution remote sensing images [C]//SPIE, 2010, 7546: 754635-1-754635-6.
- [3] Shi Hailiang, Wei Tao, Xin Xiangjun, et al. Fusion of multispectral and panchromatic images based on PCA and NSCT[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48 (10): 212-216. (in Chinese)
时海亮, 魏涛, 辛向军, 等. 基于 PCA 和 NSCT 的多光谱图像和全色图像的融合 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (10): 212-216.
- [4] Li Guangxin, Xu Shuyan, Wu Weiping, et al. Extension of Piella pixel-level multiresolution image fusion framework and its algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2773-2780. (in Chinese)

- 李光鑫, 徐抒岩, 吴伟平, 等. Piella 像素级多分辨率图像融合框架的扩展及其算法[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(12): 2773-2780.
- [5] Yang Yuetao. Fusion algorithm based on improved projected gradient NMF and NSCT [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1143-1150. (in Chinese)
杨粤涛. 采用改进投影梯度非负矩阵分解和非采样 Contourlet 变换的图像融合方法[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 1143-1150.
- [6] Liu Haibin, He Xiqin, Liu Xiangdong. Watershed and region merge-based image segmentation algorithm [J]. Application Research of Computers, 2007, 24(9): 307-308. (in Chinese)
刘海宾, 何希勤, 刘向东. 基于分水岭和区域合并的图像分割算法[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(9): 307-308.
- [7] Guo Ming, Fu Zheng, Xi Xiaoliang. Novel fusion algorithm for infrared and visible images based on local energy in NSCT domain[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2229-2235. (in Chinese)
- 郭明, 符拯, 奚晓梁. 基于局部能量的 NSCT 域红外与可见光图像融合算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2229-2235.
- [8] Ye Chuanqi, Wang Baoshu, Miao Qiguang. Fusion algorithm of multi-spectral and high-resolution images based on region feature on NSCT domain [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1240-1247. (in Chinese)
叶传奇, 王宝树, 苗启广. 一种基于区域的 NSCT 域多光谱与高分辨率图像融合算法 [J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1240-1247.
- [9] Xydeas C S, Petrović V S. Objective pixel-level image fusion performance measure[C]//SPIE, 2000, 4051: 89-98.
- [10] Wang Jinling. Research on remote sensing image fusion algorithm based on multiresolution analysis [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
王金玲. 基于多分辨率分析的遥感图像融合算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.