

基于纹理分割和 Top-Hat 变换的合成孔径雷达与 可见光图像增强融合

王志社^{1,2} 杨风暴¹ 陈磊¹ 彭智浩¹ 纪利娥¹

(¹ 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

(² 太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024)

摘要 针对目前合成孔径雷达(SAR)与可见光图像融合结果目标信息缺失、对比度不高的缺点,提出了一种基于纹理分割和 top-hat 变换的图像增强融合算法。将 SAR 图像灰度共生矩阵的熵纹理特征图进行阈值分割,提取 SAR 图像的感兴趣区域(ROD);并对 SAR 和可见光图像进行非下采样 Contourlet 变换(NSCT)分解,低频系数采用基于区域的融合规则,在感兴趣区域内选择 SAR 的低频系数。对低频系数进行 top-hat 变换得到显著化的图像亮、暗细节特征,并加入到低频系数上形成低频合成系数;高频子带系数采用局部方向信息熵显著性因子取大的融合规则;对融合系数进行 NSCT 逆变换得到最终的融合图像。实验证明了本算法的有效性。

关键词 图像处理;图像融合;灰度共生矩阵;top-hat 变换;非下采样 Contourlet 变换;局部方向信息熵

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1010002

SAR and Visible Image Enhanced Fusion Based on Texture Segmentation and Top-Hat Transformation

Wang Zhishe^{1,2} Yang Fengbao¹ Chen Lei¹ Peng Zhihao¹ Ji Li'e¹

¹ School of Information and Communication Engineering, North University of China,

Taiyuan, Shanxi 030051, China

² College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract To overcome the disadvantages of low contrast and missing target information for the existing synthetic aperture radar (SAR) and visible image fusion methods, an image enhanced fusion algorithm based on texture segmentation and top-hat transformation is proposed. Entropy texture image which is generated by gray level co-occurrence matrix of SAR image is segmented by threshold, and the region of (ROI) interest of SAR is extracted. The SAR and optical images are decomposed by the non-subsampled contourlet transform (NSCT). A region fusion rule is introduced to the low-frequency coefficient, and low-frequency coefficient of SAR is chosen in the region of interest. The significant bright and dark image detail features are extracted by top-hat transformation and the low-frequency synthetic coefficient is obtained through adding the above bright and dark features into low-frequency coefficient. High-frequency subband coefficients are fused by selecting maximum significant factor of local directional entropy. The fused image is obtained by the NSCT inverse transformation of the fused coefficient. The experiment results testify the validity of the proposed image fusion algorithm.

Key words image processing; image fusion; gray level co-occurrence matrix; top-hat transformation; non-subsampled contourlet transform; local directional entropy

OCIS codes 100.2960; 100.2000; 280.6730; 280.4750

收稿日期: 2014-06-04; 收到修改稿日期: 2014-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61171057)、教育部高等学校博士学科点专项科研(博导类)(20121420110004)

作者简介: 王志社(1982—),男,博士研究生,讲师,主要从事多源图像配准与融合技术方面的研究。

E-mail: wzs2003@163.com

导师简介: 杨风暴(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事信息处理与融合方面的研究。E-mail: yangfb@nuc.edu.cn

1 引 言

合成孔径雷达(SAR)与可见光遥感由于获取地物波谱特征信息的波段范围及成像方式不同,SAR与可见光图像在反映地物电磁波谱特征方面有很大差异。SAR图像对金属和硬物散射等物体比较敏感,反映在图像上往往是非常亮的点或区域(一般是感兴趣的目标,如飞机、城镇区域等),但整体成像强度相对较弱。而可见光图像对物体的物理和化学属性(如反射率、反照率、颜色)更为敏感,主要反映了地物的大致轮廓以及地物的光谱信息。因此将SAR和可见光图像融合,才能充分利用两者的互补信息,从而获得对目标或场景更为准确、全面、可靠的图像描述,能够减少不确定性,提高图像的可理解性,以利于目标识别^[1-3]。

目前,SAR与可见光图像融合算法主要以多尺度变换方法为主。文献[4-7]提出基于小波变换的SAR与多光谱图像融合方法,对SAR图像进行特征提取并补充到多光谱图像中,保留了原始多光谱图像的光谱特性,但所加入的SAR图像目标多表现为离散的点状目标,容易造成SAR图像目标缺失。基于Curvelet^[8]、Contourlet^[9-10]和非下采样Contourlet变换(NSCT)^[11-12]的融合方法,融合效果较小波变换有了一定的改善。其中以基于NSCT的融合方法最优,这是由于NSCT的多尺度多方向特性和平移不变性,能够有效捕捉图像中的几何特征,为图像融合提供了更多的有用信息^[13]。但由于SAR图像与可见光图像的灰度差异性大,融合图像仍存在细节信息不清楚、对比度低的缺点。文献[14-15]运用多尺度top-hat变换提取输入图像的亮、暗特征,再与源图像融合,可以提高融合图像的对比度,但由于在源图像提取的亮、暗特征不平滑,存在大量毛刺,导致融合图像存在一定的边缘区域失真现象。

为此,提出了一种基于纹理分割和top-hat变换的SAR和可见光图像增强融合算法。运用NSCT对SAR和可见光图像进行分解,在低频系数上采用基于区域的融合规则,目的是避免SAR图像重要目标信息的缺失。另外,在低频融合系数上加入top-hat变换得到的显著性亮、暗细节特征,目的是提高融合图像的对比度。对于高频子带系数的融合,采用基于局部方向信息熵显著性因子取大的融合规则,目的是减少图像噪声对融合图像细节信息的影响。实验结果表明,所提方法既能保留SAR图像的重要目标信息,又能提高融合图像的对比度,以取得更佳的融合效果。

2 融合方法

提出的SAR与可见光图像融合过程如图1所示。主要步骤如下:

- 1) 统计SAR图像的灰度共生矩阵的熵特征量得到熵纹理特征图,对其进行阈值分割,提取SAR图像的感兴趣区域 R_{SAR} ;
- 2) 对SAR和可见光图像进行NSCT分解,得到相应的低频系数 $\{C_{j_0}^s, C_{j_0}^v\}$ 和高频子带系数 $\{C_{j,l}^s, C_{j,l}^v\}$;
- 3) 低频系数采用基于区域的融合规则,在感兴趣区域 R_{SAR} 内选择SAR图像的低频系数,其他部分进行加权平均;
- 4) 在低频系数上加入经top-hat变换得到的显著化亮、暗细节特征,形成低频合成系数;
- 5) 高频子带系数采用基于局部方向信息熵显著化因子取大的融合规则;
- 6) 将低频合成系数和融合高频子带系数进行NSCT逆变换得到最终的融合图像。

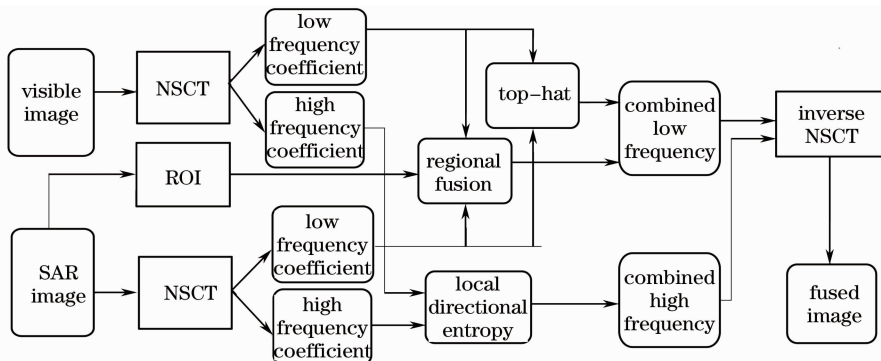


图1 所提融合方法结构框图

Fig.1 Framework of the proposed image fusion method

3 主要算法

3.1 SAR 图像感兴趣区域提取

灰度共生矩阵是通过研究灰度的空间相关特性来描述纹理的常用方法,它描述在 θ 方向上,相隔一定的像素距离 d ,灰度值分别为 i 和 j 的像素对出现的频率 $P(i, j | d, \theta)$,即为矩阵的元素。由所有像素对出现频率所组成的矩阵被称为灰度共生矩阵,即 $W = [P(i, j | d, \theta)]$ 。

SAR 图像的纹理信息比较丰富,计算 SAR 图像的灰度共生矩阵可以将图像的灰度值转化为纹理信息,统计纹理特征量可以得到相应的纹理特征图^[16]。选用熵作为纹理识别的特征量,它描述了图像纹理的复杂程度或非均匀程度。假若图像中没有任何的纹理,则灰度共生矩阵几乎为零阵,熵值接近于零;若图像中纹理丰富时,则 $P(i, j | d, \theta)$ 的数值基本相等,图像的熵值最大。熵的表达式如下:

$$S_{\text{Ent}} = - \sum_i^{L-1} \sum_j^{L-1} P(i, j | d, \theta) \log_2 P(i, j | d, \theta). \quad (1)$$

实验中采用 $11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$ 的滑动窗口,沿 $\theta=0$ 的方向、以两相邻像素距离 $d=1$ 生成灰度共生矩阵。统计灰度共生矩阵的熵特征得到相应的熵特征纹理图。通过对熵特征纹理图进行阈值分割,就可以提取 SAR 图像的兴趣区域。

3.2 多尺度 top-hat 变换

在形态学图像处理中,图像 f 的多尺度亮 top-hat 变换 $B_{B_s}(f)$ 是 f 与其开运算的差:

$$B_{B_s}(f) = f - f \circ B_s, \quad (2)$$

图像 f 的多尺度暗 top-hat 变换 $D_{B_s}(f)$ 是其闭运算与 f 的差:

$$D_{B_s}(f) = f \bullet B_s - f, \quad (3)$$

(2)式和(3)式中, \circ 表示形态学开运算, \bullet 表示形态学闭运算, B_s 表示在 s 尺度上的结构算子。

图像经亮 top-hat 变换和暗 top-hat 变换获取的结果分别表示了源图像的亮细节信息和暗细节信息,亮、暗细节特征信息的加入可以有效提高融合图像的对比度,增强图像细节信息^[14-15]。文献[15]提出了如下的多尺度 top-hat 变换。

翻转对比度算子(TCO)为

$$T_{B_s} = \begin{cases} f \oplus B_s, & \text{if } f \oplus B_s - f < f - f \ominus B_s \\ f \ominus B_s, & \text{if } f \oplus B_s - f > f - f \ominus B_s \\ f, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

基于 top-hat 的对比度算子(THCO)为

$$T_{B_s}^{\text{th}} = f + B_{B_s} - D_{B_s}. \quad (5)$$

翻转对比度算子可以获得图像的细节信息,基于 top-hat 的对比度算子可以获得图像中重要的区域信息,将两者有序结合可以有效地增强图像中的细节和区域信息^[16],结果表示为

$$S(x, y) = T[T^{\text{th}}(x, y)]. \quad (6)$$

通过比较源图像 $f(x, y)$ 和由(6)式得到的 $S(x, y)$ 的值,可得到图像在尺度 s 上的亮细节特征 $B_{B_s}^{\text{F}}$ 和暗细节特征 $D_{B_s}^{\text{F}}$ 为

$$B_{B_s}^{\text{F}} = \max\{S_{B_s}(x, y) - f(x, y), 0\}, \quad (7)$$

$$D_{B_s}^{\text{F}} = \max\{f(x, y) - S_{B_s}(x, y), 0\}. \quad (8)$$

3.3 融合规则

对 SAR 图像和可见光图像用 NSCT 变换进行多尺度多方向分解,得到相应的低频系数 $\{C_{j_0}^s, C_{j_0}^v\}$ 和高频子带系数 $\{C_{j,l}^s, C_{j,l}^v\}$ 。低频系数采用基于区域的融合规则;高频子带系数采用局部方向信息熵显著性因子取大的融合规则。

3.3.1 低频系数融合规则

低频系数反映了源图像的近似特征,它的融合规则设计对提取 SAR 与可见光图像的互补信息至关重要。由于 SAR 图像的目标指示能力强,因此在 SAR 图像的兴趣区域内选择 SAR 图像的低频系数,这样得到低频融合图像可以完整地保留 SAR 图像的重要目标信息。因此,对于 SAR 图像 I_s 和可见光图像 I_v ,低频系数采用如下融合规则:

$$C_{j_0}^{\text{F}}(x, y) = \begin{cases} C_{j_0}^s(x, y), & \text{if } R_{\text{SAR}}(x, y) = 1 \\ [C_{j_0}^s(x, y) + C_{j_0}^v(x, y)]/2, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

另外,与文献[16]不同,本文是在低频系数上进行 top-hat 变换提取图像的亮、暗细节特征,提取的特征比较平滑,避免出现毛刺现象。把亮、暗细节特征进行显著化处理后加入到低频融合图像,得到低频合成系数,这样可以提高图像的对比度,增强图像的细节信息。

利用(7)式和(8)式计算出 SAR 图像和可见光图像的低频系数在 s 尺度上的亮细节特征 $B_{B_s}^{\text{IF}_s}$ 和 $B_{B_s}^{\text{IF}_v}$,其中 $s = 1, 2, \dots, N$, N 为总的尺度数。比较不同 s 尺度的 SAR 图像和可见光图像的亮细节特征图像,采用像素取大值法,得到显著化的亮细节特征为

$$P_{\text{BIF}}(x, y) = \max\{\max[B_{B_s}^{\text{IF}I_s}(x, y), B_{B_s}^{\text{IF}I_v}(x, y)] \mid s = 1, 2, \dots, N\}. \quad (10)$$

同理, SAR 图像和可见光图像的显著化暗细节特征为

$$P_{\text{DIF}}(x, y) = \max\{\max[D_{B_s}^{\text{IF}I_s}(x, y), D_{B_s}^{\text{IF}I_v}(x, y)] \mid s = 1, 2, \dots, N\}. \quad (11)$$

将显著化的亮、暗细节特征加入到低频融合系数中, 得到低频融合系数为

$$D_{j_0}^{\text{F}}(x, y) = C_{j_0}^{\text{F}}(x, y) + P_{\text{BIF}}(x, y) - P_{\text{DIF}}(x, y). \quad (12)$$

3.3.2 高频子带系数融合规则

高频子带系数主要反映图像的边缘或细节等信息, 目前多数的高频系数融合都采用高频系数绝对值、局部能量或局部方差最大的融合准则。但由于 SAR 图像具有斑点噪声, 这些噪声的信息量或者能量也较大, 容易误作为有用信息被保留, 因此在融合过程中要区分噪声与有意义的图像特征信息。

在 NSCT 域中, 有意义的图像特征往往在少数方向上具有较大的能量, 方向分布变化较为剧烈。而噪声点虽有局部能量极大值, 但在 NSCT 域上往往表现为局部能量平坦分布在所有方向上, 方向分布变化较为平缓, 缺少方向性^[17]。基于这个特点, 构建方向信息熵显著性因子来区分有意义的图像特征和噪声。

定义图像在 j 尺度下 l 方向上以 (x, y) 为中心的区域能量为

$$E_{j,l}(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega(m, n) [C_{j,l}^I(x+m, y+n)]^2. \quad (13)$$

设 $V_j(x, y)$ 表示图像在 j 尺度下 l 维方向向量上位置 (x, y) 处的能量强度为

$$V_j(x, y) = [|E_{j,1}(x, y)|, |E_{j,2}(x, y)|, \dots, |E_{j,l}(x, y)|]^T, \quad (14)$$

将 $V_j(x, y)$ 用局部能量归一化, 可以得到局部方向能量密度分布为

$$P_j(x, y) = [p_{j,1}(x, y), p_{j,2}(x, y), \dots, p_{j,l}(x, y)]^T = V_j(x, y) / \sum_{l=1}^L |E_{j,l}(m, n)|. \quad (15)$$

这样, 定义在尺度 j 下位置 (x, y) 处方向信息熵 $S_{\text{DE}_j}(x, y)$ 为

$$S_{\text{DE}_j}(x, y) = - \sum_{l=1}^L p_{j,l}(x, y) \log[p_{j,l}(x, y)], \quad (16)$$

在此基础上, 构建方向信息熵显著性因子为

$$S_{j,l}(x, y) = |E_{j,l}(x, y)| / [1 + S_{\text{DE}_j}(x, y)], \quad (17)$$

从(17)式可以看出, 如果图像在 j 尺度 l 方向下位置 (x, y) 处具有较大的能量 ($|E_{j,l}(x, y)|$ 值较大), 同

时能量在各方向上分布变化较为剧烈 ($S_{\text{DE}_j}(x, y)$ 值较小), 表明在该位置处具有较明显的图像特征; 反之, 表明该位置处信号趋于噪声。

为此, 对于 SAR 图像 I_s 和可见光图像 I_v 高频子带系数的融合, 采用如下的融合规则:

$$C_{j,l}^{\text{F}}(x, y) = \begin{cases} C_{j,l}^{I_s}(x, y), & E_{s,j,l}^{I_s}(x, y) \geq E_{s,j,l}^{I_v}(x, y) \\ C_{j,l}^{I_v}(x, y), & E_{s,j,l}^{I_s}(x, y) < E_{s,j,l}^{I_v}(x, y) \end{cases}, \quad (18)$$

式中 $E_{s,j,l}(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega(m, n) |S_{j,l}(x+m, y+n)|^2$, $\omega = [0 \ 1 \ 0; 1 \ 4 \ 1; 0 \ 1 \ 0] / 8$.

4 实验结果及其分析

实验选取 3 组经过校正、配准后的 SAR 和可见光图像进行融合, 并与基于小波变换的融合算法 (WT)、基于 NSCT 的融合算法以及文献[16]提出基于 top-hat 变换的融合算法 (TH) 作对比, 实验结果如图 2~4 所示。其中, WT 法的基函数为“bior3.7”, 分解尺度为 2。NSCT 法的尺度滤波器为“maxflat”, 方向滤波器为“dmaxflat7”, 分解尺度为 2, 各尺度的方向数为 2 和 3。WT 法和 NSCT 法都采用低频平均、高频取大的融合规则。TH 法的分解尺度为 3。本文所提方法与 NSCT 和 TH 法的分解方式相同。

从图 2(a) 和 2(b) 可以看出, SAR 图像的目标信息突出, 灰度值较高, 而可见光图像包括了不同地物的轮廓和光谱信息 这些信息在融合结果中是非常重要的。图 2(c) 是 SAR 图像的感兴趣区域提取结果。图 2(d) 和 2(e) 是提出的在低频系数上用 top-hat 变换提取图像的显著性亮、暗细节特征, 可以看出提取的结果比较平滑, 无毛刺现象。从图 2(f)~(h) 的融合结果来看, 基于 WT 法和 TH 法的融合算法, 加入了 SAR 图像中的部分目标信息, 但还存在 SAR 图像目标缺失的情况, 例如图中标记的左上角金属物体没有清晰反映出来, 同时融合图像的地物轮廓模糊, 对比度不高。基于 NSCT 变换的融合算法, 相比较前两种方法, 较好地保留了可见光图像的地物轮廓与光谱信

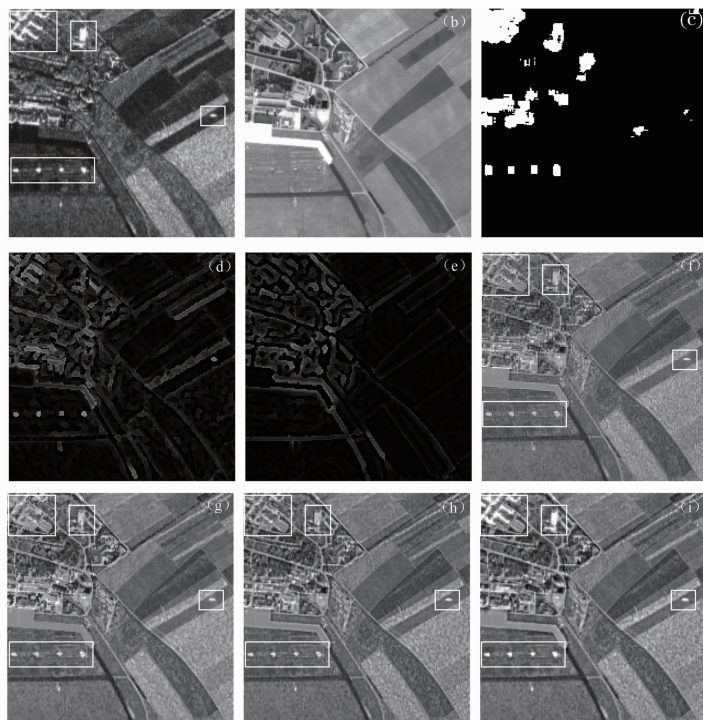


图 2 第一组实验结果比较。(a) SAR 图像;(b)可见光图像;(c) ROI;(d) P_{BIF} ;(e) P_{DIF} ;(f) WT;(g) TH;(h) NSCT;(i)所提方法

Fig. 2 Comparison results of the first experiment. (a) SAR image; (b) visible image; (c) ROI; (d) P_{BIF} ; (e) P_{DIF} ; (f) WT; (g) TH; (h) NSCT; (i) the proposed method

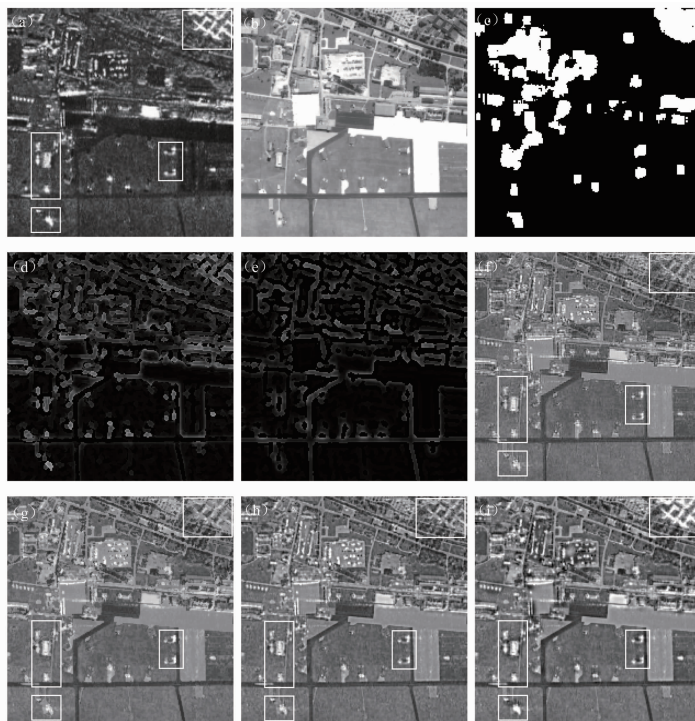


图 3 第二组实验结果比较。(a) SAR 图像;(b)可见光图像;(c) ROI;(d) P_{BIF} ;(e) P_{DIF} ;(f) WT;(g) TH;(h) NSCT;(i)所提方法

Fig. 3 Comparison results of the second experiment. (a) SAR image; (b) visible image; (c) ROI; (d) P_{BIF} ; (e) P_{DIF} ; (f) WT; (g) TH; (h) NSCT; (i) the proposed method

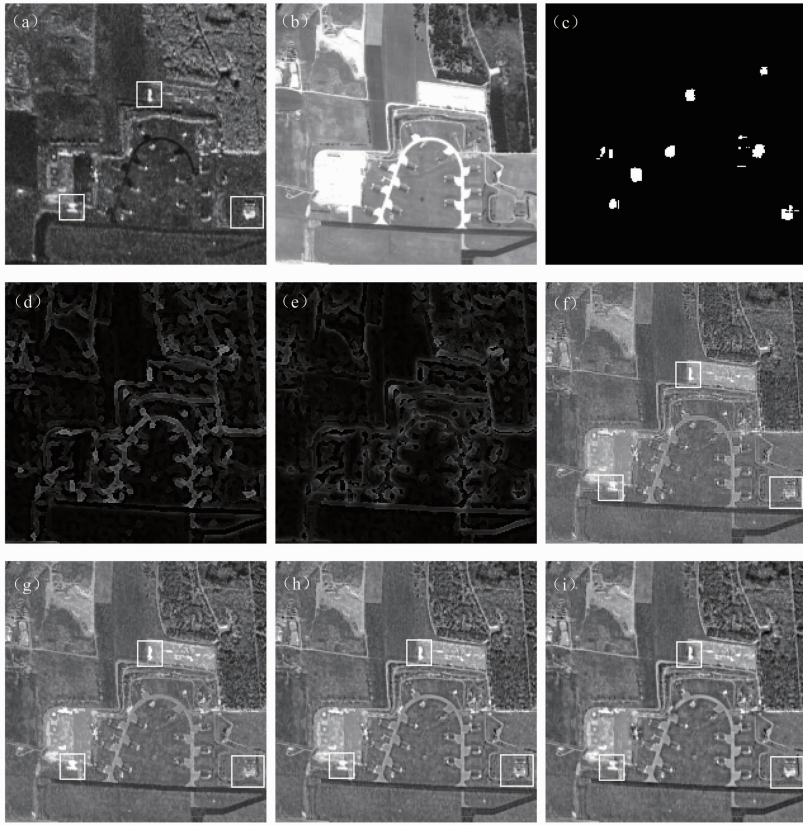


图 4 第三组实验结果比较。(a) SAR 图像;(b)可见光图像;(c) ROI;(d) P_{BIF} ;(e) P_{DIF} ;
(f) WT;(g) TH;(h) NSCT;(i)所提方法

Fig. 4 Comparison results of the third experiment. (a) SAR image; (2) visible image; (c) ROI; (d) P_{BIF} ; (e) P_{DIF} ;
(f) WT; (g) TH; (h) NSCT; (i) the proposed method

息,对比度有所提高,但仍存在 SAR 图像目标信息缺失情况,如图中标注的左上角钢架结构等目标细节依然没有很好地体现出来。从图 2(i)可以看出所提方法融合结果中目标细节信息完整,地物轮廓清晰,细节比较明显,整体对比度高。图 3 和图 4 同样说明了所提算法的优越性。

为了进一步验证融合效果,以图 2 的融合结果为例,分别放大两组细节图像进行对比,如图 5 所示。从细节图像来看,所提方法的融合结果保留 SAR 图像目标信息和地物的轮廓细节信息,对比度高,说明了所提的算法优于其他算法。

为了定量评价不同融合方法用于 SAR 和可见光图像的融合性能,采用信息熵 (IE)、平均梯度 (AG)、 Q_0 ^[18]、 Q_E ^[19]、 Q_W ^[19]、 $Q^{AB/F}$ ^[20] 参数指标进行评价。其中,信息熵反映图像所包含的信息量,信息量越大,说明融合结果越好;平均梯度是描述图像清晰度的一个物理量,平均梯度越大,图像越清晰,说明图像的对比度越高; Q_0 是一个结构相似度图像质量评价指标,是从相关性丢失、亮度失真、对比度失真三个方面对图像的失真度进行模拟; Q_W 是反映局

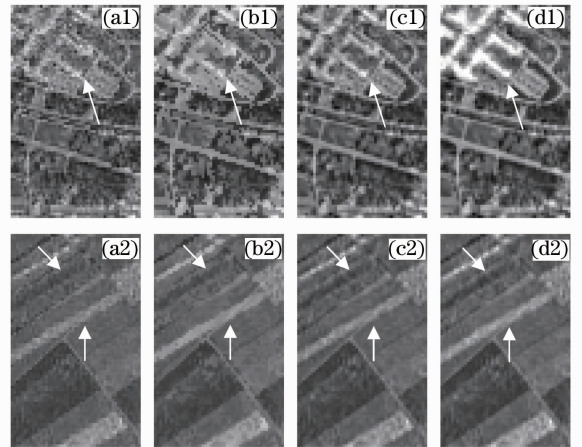


图 5 不同融合方法的部分放大图像对比结果。(a1), (a2) WT; (b1), (b2) TH; (c1), (c2) NSCT; (d1), (d2) 所提方法

Fig. 5 Partial enlarged image comparison results of different fusion methods. (a1), (a2) WT; (b1), (b2) TH; (c1), (c2) NSCT; (d1), (d2) the proposed method

部结构相似度的融合质量评价; Q_E 和 $Q^{AB/F}$ 分别从局部和整体反映了融合图像融合源图像边缘细节信

息的情况; Q_0 、 Q_E 、 Q_W 、 $Q^{AB/F}$ 的值均在 $[0,1]$ 之间,越接近 1 表明融合质量越好。每组实验的客观评价指标对比结果如表 1~3 所示。

从表 1 可以看出,所提算法的评价参数 Q_0 略低

表 1 第一组实验的客观指标比较

Table 1 Objective indicator comparison of the first group experiments

Methods	Metrics					
	IE	AG	Q_0	Q_E	Q_W	$Q^{AB/F}$
WT	6.8816	10.5534	0.5959	0.2099	0.7282	0.4224
TH	7.0530	11.8966	0.6067	0.2068	0.7384	0.4247
NSCT	6.9638	12.0297	0.6076	0.2466	0.7590	0.4962
Proposed	7.0946	12.5203	0.5931	0.2669	0.7732	0.5244

表 2 第二组实验的客观指标比较

Table 2 Objective indicator comparison of the second group experiments

Methods	Metrics					
	IE	AG	Q_0	Q_E	Q_W	$Q^{AB/F}$
WT	6.9703	12.4518	0.5259	0.1797	0.6537	0.3731
TH	7.0669	12.5727	0.5457	0.1731	0.6697	0.3724
NSCT	7.0654	14.1001	0.5442	0.2043	0.6894	0.4385
Proposed	7.2034	14.9430	0.5093	0.2191	0.6995	0.4620

表 3 第三组实验的客观指标比较

Table 3 Objective indicator comparison of the third group experiments

Methods	Metrics					
	IE	AG	Q_0	Q_E	Q_W	$Q^{AB/F}$
WT	6.8395	9.9286	0.5684	0.2075	0.7048	0.3959
TH	6.8781	10.4439	0.5806	0.2047	0.7140	0.3973
NSCT	6.9028	11.2017	0.5803	0.2344	0.7348	0.4599
Proposed	6.9697	11.5061	0.5739	0.2489	0.7431	0.4816

5 结 论

提出了一种基于纹理分割和 top-hat 变换的 SAR 和可见光图像增强融合算法。该方法通过对 SAR 图像灰度共生矩阵的熵特征进行纹理分割,提取出 SAR 图像的感兴趣区域。在融合规则设计上,低频系数采用基于区域的规则,这样可以完整地保留 SAR 图像的目标信息,克服了传统方法存在 SAR 图像目标缺失的问题;高频系数采用基于局部方向信息熵显著性因子取大的规则,能够区分有意义的图像特征和噪声,使得融合图像包含细节信息量较多。另外,在低频系数上通过 top-hat 变换提取图像的亮、暗细节特征,并作显著化处理,这些细节特征的加入可以提高图像的对比度,增强图像细节信息。从主观视觉效果和客观评价指标上来看,说明了所提融合方法的优越性。

参 考 文 献

- 1 Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Remote sensing image fusion based on spares representation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428003.
- 2 尹雯, 李元祥, 周则明, 等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428003.
- 3 G Hong, A N Zhang, F Q Zhou, *et al.*. Integration of optical and synthetic aperture radar (SAR) images to differentiate grassland and alfalfa in Prairie area [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 28(5): 12-19.
- 4 Y Z Zhang, H S Zhang, H Lin. Improving the impervious surface estimation with combined use of optical and SAR remote sensing images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 141(2): 155-167.
- 5 S H Chen, R H Zhang, H B Su, *et al.*. SAR and multi-spectral image fusion using generalized HIS transform based on atrous wavelet and EMD decompositions [J]. *IEEE Sensors Journals*, 2010, 10(3): 737-745.
- 6 L Alparone, S Baronti, A Garzelli, *et al.*. Landsat ETM+ and SAR image fusion based on generalizated intensity modulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2832-2839.
- 6 Y Chibani. Integration of panchromatic and SAR features into multispectral spot images using 'atrous' wavelet decomposition

- [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(10): 2295–2307.
- 7 Y Byun, J Choi, Y Han. An area-based image fusion scheme for the integration of SAR and optical satellite imagery [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(5): 2212–2220.
- 8 F Nencini, A Garzelli, S Baronti, *et al.*. Remote sensing image fusion using the curvelet transform [J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 143–156.
- 9 M N Do, M Vetterli. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091–2106.
- 10 Wu Yan, Xiao Ping, Wang Changming, *et al.*. Fusion segmentation algorithm for SAR images based on the persistence and clustering in the contourlet domain [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 1977–1983.
吴 艳, 肖 平, 王昌明, 等. 基于 Contourlet 域持续性和聚集性的合成孔径雷达图像融合分割算法[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1977–1983.
- 11 L D C Arthur, J P Zhou, N D Minh. The nonsubsampling contourlet transform: Theory, design, and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089–3101.
- 12 J H Adu, J H Gan, Y Wang, *et al.*. Image fusion based on nonsubsampling contourlet transform for infrared and visible light image [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 61(11): 94–100.
- 13 Liu Nannan, Xu Shuyan, Hu Jun, *et al.*. Hyper accuracy star location algorithm based on nonsubsampling Contourlet transform and mapped least squares support vector machine [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0512001.
刘南南, 徐抒岩, 胡 君, 等. 基于非下采样 Contourlet 变换和映射最小二乘支持向量机的高精度星点定位方法[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0512001.
- 14 L Miao, Y Q Zhao, X H Wang, *et al.*. Retinal vessel enhancement based on multi-scale top-hat transformation and histogram fitting stretching [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58(6): 56–62.
- 15 X Z Bai. Image fusion through feature extraction by using sequentially combined toggle and top-hat based contrast operator [J]. Appl Opt, 2012, 51(31): 7566–7575.
- 16 R M Haralick, K Shanmugam, I Dinstein. Textural features for image classification [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1973, 3(6): 610–621.
- 17 Yang Zhi, Mao Shiyi, Chen Wei. Local orientation energy based robust image fusion algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(9): 1537–1541.
杨 志, 毛士艺, 陈 炜. 基于局部方向能量的鲁棒图像融合算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1537–1541.
- 18 W Zhou, A C Bovik. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81–84.
- 19 G Piella, H Heijmans. A new quality metric for image fusion [C]. Proceedings of the Tenth International Conference on Image Processing, 2003, 3: 173–176.
- 20 C S Xydeas, V Petrovic. Objective image fusion performance measure [J]. Electronic Letters, 2000, 36(4): 308–309.

栏目编辑: 张浩佳