

文章编号:1007-2780(2014)02-0286-07

一种多传感器图像融合与数字水印技术

李新娥^{1,2*}, 班 皓³, 任建岳¹, 金龙旭¹, 李国宁¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春水务集团信息中心, 吉林 长春 130012)

摘要:在小波包域提出了一种多传感器图像融合和双水印算法。首先,利用 HIS 变换和小波包变换将多光谱和全色图像分解为多个高低频子带,根据小波包域系数特点,低频部分采用基于区域平均能量加权算法的规则进行融合,高频部分采用绝对值取大的规则进行融合。然后,在高低频图像融合系数分别嵌入一个水印,低频水印利用了离散余弦变换的聚能去相关能力,高频水印利用了图像纹理子块特征。最后,对嵌入的双水印融合图像进行攻击和分析。实验结果显示,融合图像在保留多光谱图像光谱信息的基础上有效提高了空间分辨率;加水印的融合图像具有良好的不可视性和鲁棒性。

关 键 词:图像融合;数字水印;小波包变换;离散余弦变换;HIS 变换

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142902.0286

Method of multisensor image fusion And digital watermarking

LI Xin-e^{1,2*}, BAN Hao³, REN Jian-yue¹, JIN Long-xu¹, LI Guo-ning¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Changchun Water Group, Changchun 130012, China*)

Abstract: A method of multisensor image fusion and bi-watermarking based on Wavelet Packet Transform(WPT)is proposed in this paper. First, the multispectral and panchromatic images are decomposed into more different frequency subbands by HIS and WPT transform. Due to the properties of the WPT coefficients, a regional energy weighting image fusion algorithm is presented for the low frequency subband coefficients, and for the high frequency subband coefficients, the algorithm uses the absolute value maximum selectivity scheme. Then, the watermarks are embedded in the low and high frequency of the fusion image wavelet packet decomposition. The low frequency watermark uses the DCT energy compression ability and the ability of ridding correlation, and the high frequency watermark uses the streak blocks of the fusion image. Finally, the watermarked fusion image is attacked. The experimental results show that, the watermarked fusion image keeps good spectral information

收稿日期:2013-10-29;修订日期:2013-11-25.

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20126016)

* 通信联系人, E-mail: amylxe@sohu.com

and spatial resolution, and the watermarks embedded in the fusion image are robust and invisible.

Key words: image fusion; digital watermark; wavelet packet transform; discrete cosine transform; HIS transform

1 引言

多传感器图像融合是综合多个源图像信息,得到同一个场景更为全面的图像。多光谱图像和全色图像的融合图像具有较高的空间细节表现能力并且保留了多光谱图像良好的光谱特性。目前,基于小波变换的图像融合算法是多传感器图像融合领域中常用的算法,小波变换融合方法能够比较好地保留多光谱图像的光谱信息,但小波分解只能对低频信号进行,其融合图像的纹理细节不丰富,会产生比较严重的方块效应。针对小波变换在图像融合时的缺陷,本文将小波包变换应用于图像融合。小波包变换继承了小波变换的优势,弥补了小波变换的不足,小波包变换对图像的高频部分能够实现更加精细的分解^[1]。

图像作为信息表达的主要方式,图像信息安全是现在信息安全技术研究的焦点。数字水印作为常用的信息安全技术^[2],将其用于多光谱图像和全色图像的融合图像,在遥感图像信息安全技术领域具有重要理论意义和实用价值。本文主要研究基于小波包变换(WPT)域的遥感图像融合和数字水印算法。实验结果表明本文算法具有良好的图像融合性能,加入融合图像的水印具有良好的不可视性和鲁棒性。

2 设计策略和方法步骤

本文利用 HIS、WPT 和离散余弦变换(DCT)对多光谱和全色图像进行融合和水印加密,提出了一种 WPT 域内基于区域能量和 DCT 变换的多光谱和全色图像融合和数字水印技术。

2.1 多光谱图像 HIS 变换

IHS(Intensity, Hue, Saturation)表示强度、色调和饱和度,IHS 彩色空间变换是指将 RGB(Red, Green, Blue)空间的图像分解成空间信息(I)和光谱信息(H, S),HIS 变换是基于 IHS 色彩模型的融合变换方法^[3]。本文利用 HIS 变换对待融合的多光谱图像进行预处理,并使用分

离出的强度分量 I 增强待融合全色图像的对比度,最后利用 HIS 反变换得到融合图像。HIS 正反变换算法如公式(1)和公式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_{\text{new}} \\ G_{\text{new}} \\ B_{\text{new}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $H = \tan^{-1}(v_1/v_2)$, $S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$, R_0 、 G_0 、 B_0 分别为原多光谱图像的红、绿、蓝波段, I' 为多光谱图像 I 分量图像和直方图匹配后的全色图像进行融合后得到融合分量, R_{new} 、 G_{new} 、 B_{new} 分别为融合图像的红、绿、蓝波段。

2.2 基于 WPT 的融合策略

对图像进行小波包分解是对图像依次按行和列采用低通滤波器和高通滤波器进行滤波,然后进行相应下采样,在用小波包对图像进行分解时,不仅要每次分解后得到的低频图像继续进行分解,而且需要对每次分解后所得到的高频图像继续进行分解。图 1 为三级小波包完全分解树型图,表明了图像小波包分解过程。

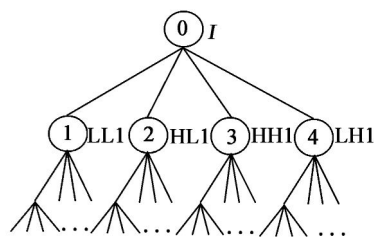


图 1 $L(L=3)$ 级小波包完全分解树型图

Fig. 1 Three-level WPD tree

通过一次小波包分解,图像被分解为 4 个子带图像(图 1 中所标注的数字 0, 1, 2, 3 是相应

各级子带在树中的结点值): LL1 为水平和垂直方向的低频子带图像, LH1 为水平方向的低频和垂直方向的高频子带图像, HL1 为水平方向的高频和垂直方向的低频子带图像, HH1 为水平和垂直方向的高频子带图像。如果分别对 4 个子带图像再进行进一步小波分解, 又可得到各自更低分辨率的 4 个子带图像。对图像进行小波包分解时, 不论是对低频子带图像还是高频子带图像, 小波包都进行分解并得到与之相应的一个低频分量和 3 个方向的高频分量, 并且每个分量为子带图像大小的 $1/4$ 。图像的 L 级小波包分解包括一个逼近子图和若干细节子图。

对多光谱图像的 I 分量和全色图像进行三级小波包分解, 如图 2 所示, 图中标注的数字是相应各级子带在树中的结点值, 分别得到 64 个子带图像, 包括一个逼近子图(结点数为 21)和 63 个细节子图。逼近子图和细节子图的低频子带共有 28 个(阴影部分), 细节子图的高频子带共有 36 个(非阴影部分)。

21	22	25	26	37	38	41	42
24	23	28	27	40	39	44	43
33	34	29	30	49	50	45	46
36	35	32	31	52	51	48	47
69	70	73	74	53	54	57	58
72	71	76	75	56	55	60	59
81	82	77	78	65	66	61	62
84	83	80	79	68	67	64	63

图 2 第三级小波包分解子带示意图

Fig. 2 Three-level WPD sub-bands

图 2 中, 28 个逼近子图和细节子图的低频子带能够反映源图像大致轮廓, 36 个细节子图的高频子带更多反映源图像的细节信息, 所以对这两部分采用两种不同的融合准则进行融合。

在第三级小波包分解的逼近子图和细节子图的低频带区域共 28 个子带, 采取基于区域平均能量加权算法融合准则 1 进行融合; 在第二级小波包分解细节子图的高频带区域共 9 个, 采取绝对值取大的融合准则 2 进行融合。待融合图像小波

包分解融合子带选择如图 3 所示, 图中阴影部分是第三级小波包分解在树中的结点值, 非阴影部分是第二级小波包分解在树中的结点值。

21	22	25	26	37	38	10
24	23	28	27	40	39	
33	34	29	30	12		11
36	35	32	31			
69	70	18		53	54	14
72	71			56	55	
20		19		16		15

图 3 小波包分解融合子带选择示意图

Fig. 3 Selected WPD sub-bands

(1) 融合准则 1 实现过程如下:

设待融合图像为 I_L 、 P_L , 融合结果为 F_L 。分别计算 I_L 和 P_L 的区域能量 $E_{x,L}$ 和 $E_{p,L}$, 其中区域的大小为 3×3 。

$$E_{I,L}(m, n) = \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 \left[I_L(m+i, n+j) \right]^2, \quad (3)$$

$$E_{P,L}(m, n) = \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 \left[P_L(m+i, n+j) \right]^2, \quad (4)$$

$$F_L(m, n) = \alpha I_L(m, n) + \beta P_L(m, n), \quad (5)$$

其中, 加权系数 α 和 β 定义如下:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{V_{I,L}(m, n)}{V_{I,L}(m, n) + V_{P,L}(m, n)} \\ \beta = \frac{V_{P,L}(m, n)}{V_{I,L}(m, n) + V_{P,L}(m, n)} \end{cases}. \quad (6)$$

(2) 融合准则 2 实现过程如下:

设待融合图像为 I_H 、 P_H , 融合结果为 F_H , 分别计算 I_H 和 P_H 的绝对值 $S_{I,H}$ 和 $S_{P,H}$ 。

$$P_H(m, n) = \begin{cases} I_H(m, n), & S_{I,H} \geq S_{P,H} \\ P_H(m, n), & S_{I,H} < S_{P,H} \end{cases}. \quad (7)$$

然后对融合后的逼近子图和各细节子图加入水印, 最后进行小波包逆变换, 得到加水印融合图像的高分辨率 I' 分量, 利用 HIS 逆变换得到具有光谱特性的高分辨率加水印融合图像。

2.3 基于 WPT 和 DCT 的数字水印技术

小波包分解的细节子图是图像的高频区域, 反映图像的边缘和纹理细节, 在此嵌入的水印不容易被人眼察觉, 具有良好的不可视性, 但对图像有损压缩等图像处理鲁棒性弱。逼近子图聚集了图像的绝大多数能量, 是图像的低频区域, 在此部

分嵌入的水印鲁棒性较高,信息不易丢失,但是低频部分反映图像的平滑区域,嵌入水印容易影响图像的质量,不可视性较弱。结合上述两点的不同,文中采用两种方法在融合图像小波包分解的高频带区域和低频带区域分别嵌入一个水印^[6],使嵌入两个水印的融合图像具有良好的不可视性和鲁棒性。

2.3.1 水印嵌入

(1)用密钥 S 产生具有高斯正态分布 $N(0,1)$ 的随机实数序列构成的水印信号 $W = \{\omega_i, 0 \leq i \leq K\}$ 。

(2)对融合图像 F_L 的第三级逼近子带小波包系数(图3中结点值为21的子带)做DCT变换,在幅值最大的前 K 个DCT系数上嵌入整个水印序列(不包括直流分量),其他DCT系数保持不变,公式如下:

$$\left. \begin{aligned} X &= \text{DCT}(\hat{X}) \\ X_i^{\max, w} &= X_i^{\max} (1 + \alpha W) \quad (0 \leq i < K) \\ Y &= \begin{cases} X_i^{\max, w} & (0 \leq i < K) \\ X_{\text{其他}} & \end{cases} \\ \hat{X} &= \text{IDCT}(Y) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $\hat{X}$ 为融合图像 F_L 逼近子带的小波包系数, $X_i^{\max} (0 \leq i < K)$ 为 K 个幅值最大的DCT系数, $X_i^{\max, w} (0 \leq i < K)$ 为 $X_i^{\max} (0 \leq i < K)$ 嵌入水印后的值, $\hat{Y}$ 为嵌入水印后的逼近子带小波包系数, W 是嵌入的水印序列, α 是水印嵌入强度。

(3)对融合图像 F_L 的第三级小波包多分解细节子带的低频带区域的纹理子块嵌入水印(图3中除了结点值为21的阴影部分子带,共27个子带)。先对选择的各细节子带进行 $m \times n$ 子块划分,根据各细节子带的边缘图,确定该子块如果是强纹理块(给定阈值),结合HVS特性在子块幅值最大的系数嵌入一个水印值,直到嵌入整个水印序列,公式如下:

$$X = \begin{cases} \hat{X} + \beta W & \text{低频带区域的纹理子块} \\ \hat{X} & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\hat{X}$ 为融合图像 F_L 细节子带的小波包系数, X 是嵌入水印后的细节子带系数, W 是嵌入的水印序列, β 是水印嵌入强度,因为低频和高频子带对噪声的敏感度不同, β 取值比较 α 大。

2.3.2 水印检测

(1)用密钥 S 产生高斯正态分布的伪随机实数序列 $W = \{\omega_i, 0 \leq i < K\}$ 。

(2)对融合图像和加水印融合图像进行三级

小波包分解,得到各自的逼近子带1个和细节子带27个。

(3)对融合图像和加水印融合图像各自的逼近子带小波包系数进行DCT变换,根据融合图像DCT域幅值最大的前 K 个系数的位置来确定加水印融合图像的水印嵌入位置,抽取水印测试序列 $D_1 = \{d_1(i), 0 \leq i < K\}$ 。用相关度 ρ 对抽取的水印序列和原始水印序列的相似性进行定量评价:

$$\rho = \text{sim}(W, D) = W \cdot D / \sqrt{D \cdot D} \quad (10)$$

式中, D 是待测试的水印序列, W 是嵌入的原始水印。用式(10)计算出从逼近子带抽取的水印序列与原始水印序列的相关度 ρ_1 。

(4)从融合图像各细节子带纹理子块的位置来确定加水印融合图像的水印嵌入位置,抽取相应的水印测试序列 $D_2 = \{d_2(i), 0 \leq i < K\}$ 。用式(10)计算从细节子带抽取的水印序列与原始水印的相关度 ρ_2 。

(5)令 $\rho = \max(\rho_1, \rho_2)$, 用值来判断水印的存在性,若 ρ 超过某一阈值 T , 则判定图像中存在此水印,取阈值 $T=5$ 比较合适^[1]。

2.4 方法步骤

本文图像融合和给融合图像加水印的实现框图见图4,具体过程可分为以下几个步骤:

(1)将低空间分辨率的多光谱图像从RGB空间转换到IHS空间。得到强度(I)、色调(H)和饱和度(S)分量。

(2)对全色图像和多光谱图像的 I 分量进行三级小波包分解,在逼近子图和细节子图的低频带区域采取基于区域平均能量加权算法融合规则,在细节子图的高频带区域采取绝对值取大的融合规则。

(3)在融合系数细节子图的低频带区域的纹理区嵌入水印信息,而保持高频带区域的小波系数不变;对融合系数的逼近子图做离散余弦变换,将水印信息叠加到DCT域幅值最大的前 K 个系数上。

(4)将嵌入水印的融合系数进行小波包逆变换,得到加水印融合图像的强度分量 I' 。

(5)将 I' 分量, H 分量与 S 分量进行HIS逆变换得到具有光谱特性的高分辨率加水印融合图像。

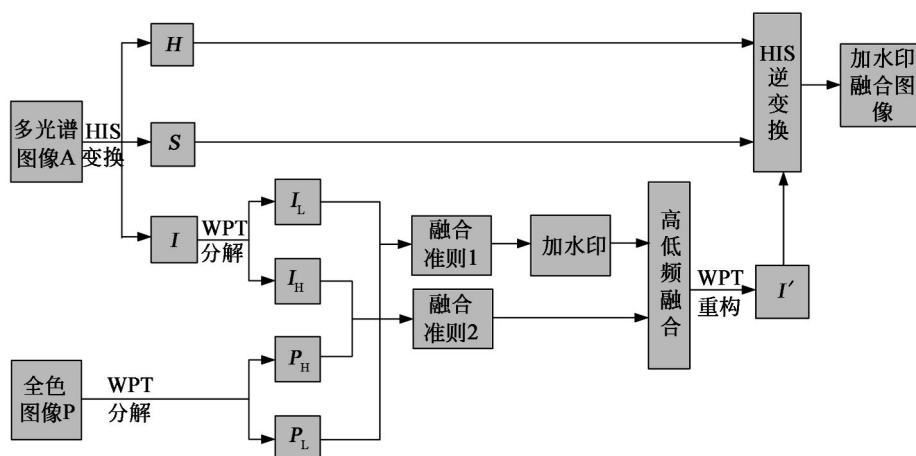


图 4 图像融合和给融合图像加水印的实现框图

Fig. 4 Block diagram of image fusion and watermark embedded

3 结果与讨论

实验中,待融合的两幅图像都已经过严格的配准;小波包分解采用 Daubechies7/9 小波基,分解层数为 3 层。图 5(a)和图 5(b)分别是待融合的全色图像和多光谱图像,两个图像大小均为 256×256 pixel,图 6 和图 7 为加水印融合图像及其水印检测响应。本文算法中嵌入水印的细节子带纹理子块大小为 2×2 ,伪随机产生 200 组具有高斯正态分布 $N(0,1)$ 的实数序列,每组伪随机数为 200 个,即 $K=200$,选择第 100 组作为嵌入融合图像中的水印序列 W ,其逼近子带水印嵌入强度 $\alpha=0.1$,细节子带水印嵌入强度 $\beta=0.2$ 。图 8(a)~8(d)为受攻击后的融合图像。

从图 6 可以看出,通过本文方法得到的加水印融合图像具有丰富的光谱信息和清晰的纹理细节。图 7 是从图 6 检测出的水印响应值($\rho=14.7062$),相关度 ρ 远超过阈值 $T(T=5)$,可见加入的水印具有良好的不可视性。为了验证加入水印的鲁棒性,本文对加水印图像进行了攻击,图 8(a)~图 8(d)分别为对加水印融合图像进行以下 4 种攻击后的图像:添加方差为 0.01 的高斯白噪音、边缘剪切 1/8、对比度增强和联合攻击(先加方差 0.01 的高斯白噪音,然后对其进行缩放失真),实验结果表明经各种攻击后的图像虽然质量退化比较严重,但从中检测到的水印响应值均大于 5,可以看出融合图像加入的水印具有良好的鲁棒性。

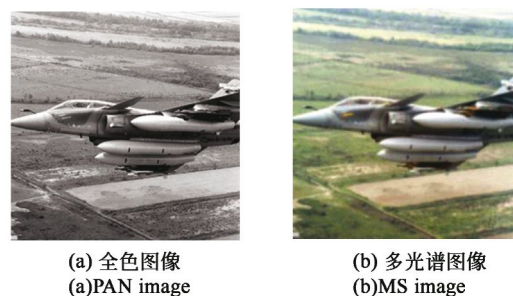


图 5 实验原图像

Fig. 5 Original images



图 6 加水印融合图像

Fig. 6 Watermarked fusion image

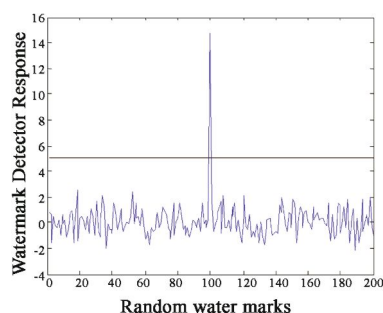


图 7 水印检测响应

Fig. 7 Watermark response



图8 受攻击后的加水印融合图像

Fig. 8 Attacked fusion images with watermarks

4 结 论

基于 WPT、HIS 和 DCT 变换提出一种多传感器图像融合方法和数字水印技术。在使用小波包变换对图像进行分解时,能够有效提取图像的特征信息,能够很好地将源图像的细节融合在一起,取得较好的图像融合效果。HIS 变换是基于 IHS 色彩模型的融合变换方法,本文方法利用 HIS 变换对待融合的多光谱图像进行预处理,并使用分离出的强度分量 I 增强待融合全色图像的对比度。本文利用 DCT 的聚能和去相关能力嵌入水印,增强了嵌入水印的鲁棒性。实验结果表明本文方法得到的加水印融合图像在保留多光谱图像光谱信息的基础上有效提高了空间分辨率,并且加入的水印具有良好的不可视性和鲁棒性。本文方法在多传感器遥感图像融合和遥感图像信息安全技术领域具有重要理论意义和实用价值。

参 考 文 献:

- [1] Wang Z L, Wan H J, Zhang A D, et al. A New remote-sensed image fusion using wavelet packet transform with the best basis [C]. *Proc of SPIE*, 2008, 7147(714713): 1-8.
- [2] Cox I, Kilian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [3] CARPER W J, LILLESAND T M, Kiefer R W. The use of intensity hue saturation transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. *Photogramm Eng. Remote Sens.*, 1990, 56(4): 459-467.
- [4] Chibani Y, Houacine A. Redundant versus orthogonal wavelet decomposition for multisensor image fusion [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(4): 879-887.
- [5] 楚恒, 朱维乐. 基于 DCT 变换的图像融合方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 266-273.
Chu H, Zhu W L. Image fusion algorithms using discrete cosine transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 266-273. (in Chinese)
- [6] 李新娥, 王珂, 崔艳秋. 基于小波包变换和离散余弦变换的双水印算法[J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(1): 61-67.
Li X E, Wang K, Cui Y Q. A WPT and DCT based bi-watermarking algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(1): 61-67. (in Chinese)
- [7] 王昕. 含噪声图像的多聚焦融合算法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2977-2984.
Wang X. Multi-focus fusion algorithm for noisy images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2977-2984. (in Chinese)
- [8] 李旭东. 抗亮度和对比度攻击的 DCT 域图像数字水印算法[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(6): 1184-1190.
Li X D. Image digital watermarking algorithm in DCT domain for resisting brightness-and-contrast adjusting attack [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(6): 1184-1190. (in Chinese)
- [9] 唐艳秋, 张星祥, 李新娥, 等. 基于人眼视觉灰度识别特性的图像动态范围小波变换处理方法[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(3): 385-390.
Tang Y Q, Zhang X X, Li X E, et al. Image processing method of dynamic range with wavelet transform based on human visual gray recognition characteristics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(3):

385-390. (in Chinese)

- [10] 陈小林, 王延杰非下采样变换的红外与可见光图像融合中国光学[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 489-496.

Chen X L, Wang Y J. Infrared and visible image fusion based on nonsubsampling Contourlet transform [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 489-496. (in Chinese)

作者简介:李新娥(1976—),女,河南南阳人,博士研究生,副研究员,主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: amylxe@sohu.com