

文章编号: 0253-2239(2008)06-1067-06

基于可见光的多波段偏振图像融合新算法

张晶晶^{1,2} 方勇华¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室, 安徽 合肥 230031; ² 安徽大学 电子工程与技术学院, 安徽 合肥 230039)

摘要 采用了一种新的基于小波变换的偏振图像融合算法。首先,将两个波段中的每一波段三幅偏振图像利用小波变换分解成低频和高频部分,低频的小波系数平均值作为融合后的低频系数,高频细节系数根据不同区域特征选择方法以及对应输入图像小波系数的窗口区域方差来确定融合后高频小波系数,得到一个波段一幅图像。接着,将得到的图像再进行小波分解,采用低频图像的小波系数最小值作为融合后的低频系数,高频图像根据纹理一致性测度的纹理检测确定融合规则,用来调整高频小波系数,将来自不同图像的特征与细节融合在一起,并对融合图像质量进行了对比评价。实验结果表明,融合后的偏振图像不仅反映了场景的偏振信息,而且还包含了丰富的光谱信息,目标与背景的衬比度也得到了增强,为进一步的目标检测和识别提供了便利。

关键词 偏振图像; 边缘检测; 纹理一致性测度; 性能评价

中图分类号 TP751.2 文献标识码 A

Novel Image Fusion Algorithm for Multi-Band Polarimetric Image Based on Visible Light

Zhang Jingjing^{1,2} Fang Yonghua¹

¹ Remote Sensing Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China

Abstract An novel image fusion algorithm of remote polarimetric image based on wavelet transform is proposed. At first, three polarimetric images in each band of two bands are decomposed into images of low frequency band and high frequency band by wavelet transform. The fused low frequency approximate coefficients are obtained with average method, and the fused high frequency detailed coefficients are obtained with different area-based feature selection method by setting each coefficient equaling the corresponding input image wavelet coefficients that has the greatest multi-window local deviation. One image in 555 band and the other in 665 band are obtained. Then, the algorithm decomposes the two images in one band into parts with low frequency band and high frequency band by wavelet transform, it adopt the minimum low frequency image wavelet coefficients as the fused low frequency image wavelet coefficients, and high frequency image fusion rules based on the texture detection algorithm of texture homogeneity measurement are used to adjust high frequency image wavelet coefficients. The low frequency component and orientation detail component of image are fused pertinently, features and details from different images are fused successfully and the quality of these fusion images is compared. The experimental result shows that the fused images present the polarization information, acquire more spectral information and higher contrast, and object detection and recognition can be more easy with fused images.

Key words polarimetric image; edge detection; texture homogeneity measure; performance evaluation

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-12-03

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z131)资助课题。

作者简介: 张晶晶(1974—),女,讲师,博士研究生,主要从事遥感图像的处理和分析等方面的研究。

E-mail: helenzjj@aiofm, ac. cn

导师简介: 方勇华(1966—),男,研究员,主要从事卫星遥感和环境监测等方面的研究。

E-mail: yhfang2aiofm, ac. cn

1 引言

偏振遥感图像通常采用斯托克斯参量 I, Q, U 表征偏振遥感信息,即这样表征目标信息都是独立的^[1,2]。因此,根据偏振图像这一特征,融合后的图像应该保留强度图像所表现的低频特性,又突出偏振特性所表现目标的高频特征,从而改善图像目标的识别能力。而图像融合技术就是将多通道的关于同一目标或场景的图像经过一定的处理,融合多个源图像中的冗余信息和互补信息,突出和强化图像中的有用信息,增加图像的可靠性以使综合后的信息更加丰富,使图像的特征更适合观察,以利于对图像进一步分析、理解及目标的测试、识别或跟踪。

小波分解是时间-尺度分析和多分辨率分析的一种方法,是时间与频率上的局部分析,提取信号和分析局部信息。图像的小波分解是通过二维离散小波变换把图像分解为不同分辨率的高频和低频小波系数,分别提取二维图像的低频分量以及水平、垂直、对角方向的高频分量,在这些特征域内进行针对性的图像融合^[3]。

纹理是在某一确定的影像区域中,相邻像素的灰度服从某种统计排列规则而形成的一种空间分布^[4]。偏振图像中含有丰富的纹理,不同的地表粗糙度呈现出不同的纹理特征,因而可从图像中提取有关信息。

本文采用基于小波变换的方法用纹理测度一致性和边缘信息相结合的融合策略将两个波段的偏振图像进行融合,得到的融合图像性能优于单纯小波变换的融合结果,尽可能地保留图像的真实边缘细节部分,有效地将来自六个不同偏振角、不同波段的图像的特征与细节有机地融合起来。

2 偏振信息的定量描述

电磁波经过地物反射后基本上是部分偏振光,在描述地物的偏振状态时,经常使用斯托克斯矢量 $T(I, Q, U, V)$ 表示准单色平面波的偏振态:

$$\begin{cases} I = S_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle, \\ Q = S_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle, \\ U = S_3 = 2 \langle E_x E_y \cos \varphi \rangle, \end{cases} \quad (1)$$

式中 I 为总的光强, Q, U 分别代表两个方向上的线偏振光, V 是圆偏振光。

$\langle E \rangle$ 为时间平均的效果,在任一 xoy 平面,在与 x 轴的夹角为 α 的方向上进行观测所得到的光强

$$I(\alpha) = \langle E_x^2 \rangle \cos^2 \alpha + \langle E_y^2 \rangle \sin^2 \alpha + \langle E_x E_y \rangle \sin(2\alpha), \quad (2)$$

或

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha). \quad (3)$$

根据斯托克斯参量可以得到目标的偏振度 P 和偏振角 θ :

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \quad 0 \leq P \leq 1 \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan(U/Q), \quad 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad (5)$$

在实际探测中,我们通过探测三个不同角度($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)的线偏振光的光强 $I(\alpha_i)$ 就可以求出斯托克斯参量 I, Q, U , 并可以求出偏振光的偏振度和偏振角。通常偏振成像探测可以获得强度 I 图像、偏振度 P 图像以及偏振角 θ 图像。利用这三种图像信息可以完整地描述偏振遥感信息,表示目标的本征状态特征^[5]。

3 基于纹理一致性测度融合策略

目前,纹理特征提取对偏振图像分析主要有三个方面。首先,纹理分析方法可作为一种很有力的边缘检测手段;其次,引入纹理信息可提高分类精度;再者,根据纹理测度可区分某些目标^[6]。本文则是利用偏振图像的边缘信息和纹理信息进行数据融合。偏振图像中的边缘信息和纹理信息表现为图像的细节信息,因此大部分边缘信息和纹理信息对应于小波分解后的高频子带,而图像的近似信息对应于小波分解后的低频基带。为此提出基于窗口的融合策略,采用窗口的方法对图像不同局部分别按照不同的情况进行融合,可以避免全局融合带来的细节过大平均或细节丢失,同时减小对源图像的预处理要求,考虑相邻像素之间的相关性,使提取图像的边缘点更好地体现图像的细节。这种以图像的边缘为参考,围绕边缘建立融合策略,能够更好地实现细节与整体性视觉的有机融合。

图像由不同灰度等级的区域组成。有效边缘不仅仅是灰度突变,还是不同区域之间的边界,它具有方向性。有效边缘不仅在局部反映出灰度突变的特征,同时也是图像轮廓结构的一部分。如果区域内特征是一致的,就认为是平滑区;如果有差异就判定为边缘区。区域纹理一致性测度就是对区域内特征是否存在差异的度量。

由于本算法是将两个波段(555 nm 波段和 665 nm 波段)共 6 幅图像进行融合,所以融合的总体规划分为两阶段。

第一阶段:分别将 555 nm 波段和 665 nm 波段中 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 三幅图像融合采用边缘信息的方法

分别合成一幅图。

设小波系数区域中心点 $W(i, j)$ 的主窗口区域和子窗口区域方差分别为 $\sigma_w(i, j)$ 和 $\sigma_{sw}(i, j)$, 利用主窗口区域和子窗口区域方差 $\sigma_w(i, j)$ 和 $\sigma_{sw}(i, j)$ 的大小, 可将小波系数分类为重要边缘点和非重要边缘点(为了减少计算量, 选用 3×3 的邻域进行操作)。

中心点 $W(i, j)$ 的方差可取为

$$\sigma(i, j) = \begin{cases} \sigma_{sw}(i, j), & \sigma_{sw}(i, j) \geq \sigma_w(i, j) \\ \sigma_w(i, j), & \sigma_{sw}(i, j) < \sigma_w(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

具体融合步骤如下(图 1):

1) 对待融合的源偏振图像 A, B, C (分别为 0° 、 60° 、 120°) 分别进行离散双正交小波变换分解生成低频图像和一系列不同尺度的高频图像。

2) 利用(6)式计算待融合高频子图像对应局部

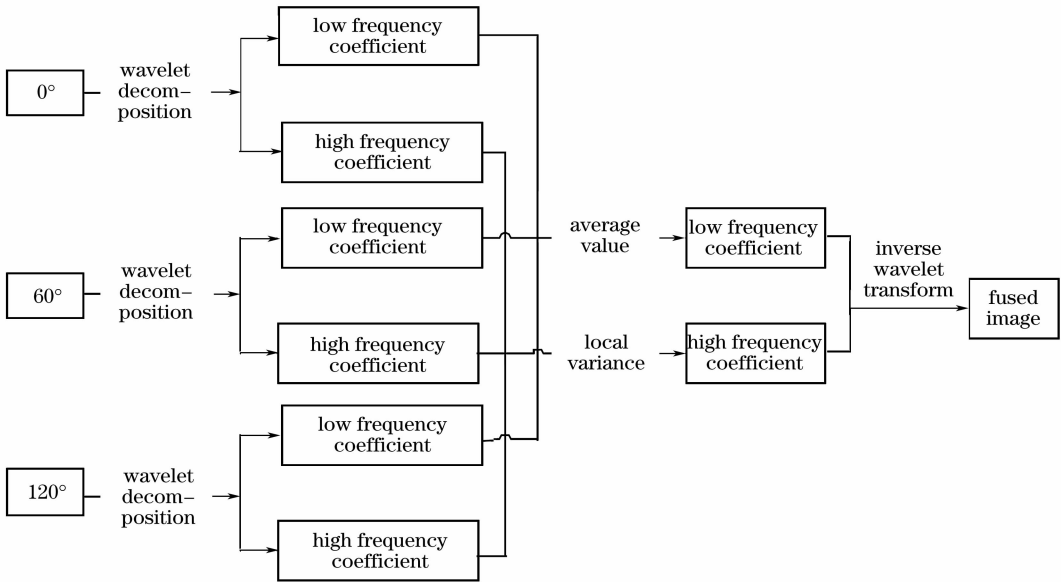


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm process

第二阶段: 将上一步得到的 555 nm 波段的偏振图和 665 nm 波段的偏振图采用纹理测度一致性的融合规则进行最终的融合。

首先, 将得到的两个波段的图像再分别进行离散双正交小波变换, 根据小波变换得到的每层小波系数代表图像在不同尺度下图像信息的反映, 可以对每层分解出来的子带图像进行有效边缘检测, 这主要根据纹理一致性测度决定有效边缘区还是平滑区。该规则取水平、垂直和对角 3 个方向高频分量的处理, 尽可能地体现源图像的细节, 维持图像整体性, 达到较好的视觉效果。

在小波分解后的子带图像高频分量中选定图像

方差。

3) 利用局部方差准则进行边缘区和平滑区的区分, 再分别进行对应高频子图像的融合, 设融合后图像高频为 $f(i, j)$, 则对于有效边缘区则取方差最大的高频系数; 对于有效平滑区则加权

$$f(i, j) = \frac{\sigma_A}{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C} W_A(i, j) + \frac{\sigma_B}{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C} W_B(i, j) + \frac{\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C} W_C(i, j), \quad (7)$$

4) 对 A, B, C 图像对应的低频小波系数进行平均作为融合后图像的低频小波系数。

5) 最后将融合变换获得的小波系数进行离散双正交小波的逆变换即可得到融合后的图像。

中任一像素 (i, j) , 以其为中心取 $(2n+1) \times (2n+1)$ 窗口, 邻域中心像素点为 $F(i, j)$, 分别计算水平、垂直和对角三个方向的纹理测度

$$\begin{aligned} FT_H(i, j) &= \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} |W_H(k, l) - M_H(i, j)|, \\ FT_V(i, j) &= \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} |W_V(k, l) - M_V(i, j)|, \\ FT_D(i, j) &= \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} |W_D(k, l) - M_D(i, j)|, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $M_H(i, j)$, $M_V(i, j)$ 和 $M_D(i, j)$ 分别为窗口内 (i, j) 处小波变换的水平分量均值、垂直分量均值和对角线分量均值。

通过中心像素点 $F(i, j)$ 作方向为 θ (一般取 $\theta = 0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ$) 的直线将邻域划分为 S_1 、 S_2 两大区域。

令

$$GS_1 = \frac{1}{n(2n+1)} \sum_k \sum_m FT_{h,v,d}(k, m), \quad (9)$$

$$(k, m) \in S_1$$

$$GS_2 = \frac{1}{n(2n+1)} \sum_k \sum_m FT_{h,v,d}(k, m), \quad (10)$$

$$(k, m) \in S_2$$

则各高频分量图像各区域中心像素 $F(i, j)$ 在不同方向上的纹理一致性测度为

$$THM_{HVD\theta_k} = |GS_1 - GS_2|, \quad (11)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, N$$

式中 θ_k 表示区域不同的邻域划分方向。

定义目标的纹理一致性测度 THM 为

$$THM = \lambda_1 THM_H + \lambda_2 THM_V + \lambda_3 THM_D, \quad (12)$$

式中一般取 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1/3$ [7]。

若 $F(i, j)$ 处在边缘区内, 则必有一个方向将区域分成两个部分, 使两边的小波系数差别最大, THM 值最大, 而其他方向的 THM 值较小, 说明区域内存在某一个方向特征差异越大, 那么反映该中心点是边缘点的可能性就越大。若 $F(i, j)$ 处在平滑

区内, 则两边的小波系数差不多, 这个方向的 THM 值比较小, 说明区域内各个方向存在一致性, 中心点处于平滑区, 反映该点是边缘点的可能性越小 (其中 k 反映的是区域内三个方向的划分)。

同时, 必须采用概率调整原理即采用“多数”原则对融合后的各个频带数据进行一致性检测与调整, 以确定该有效区域是否是有效边缘还是有效平滑区。

第二阶段融合步骤如下 (图 2):

1) 将上一阶段得到的两个波段图像的偏振图像分别再进行离散双正交小波变换分解生成低频图像和一系列不同尺度的高频图像。

2) 在对应低频系数方向上, 采用取较小值的方法来构成融合图像小波低频系数矩阵。

3) 对于反映图像细节的高频小波系数采用纹理一致性测度来分析一定区域不同方向的边缘性。如果是边缘区, 则选取对应边缘区域纹理一致性最大的高频图像小波系数作为融合后相应的小波系数。如果是平滑区, 可以采用区域能量的融合策略, 分别计算待融合图像相应区域的能量, 同时计算两图像在该区域的匹配度, 并根据其匹配度的大小来确定两待融合图像小波系数在融合图像小波系数中所占的比重, 得到融合后图像高频小波系数。

4) 将获得的融合变换获得的小波系数进行离散双正交小波的逆变换即可得到融合后的图像。

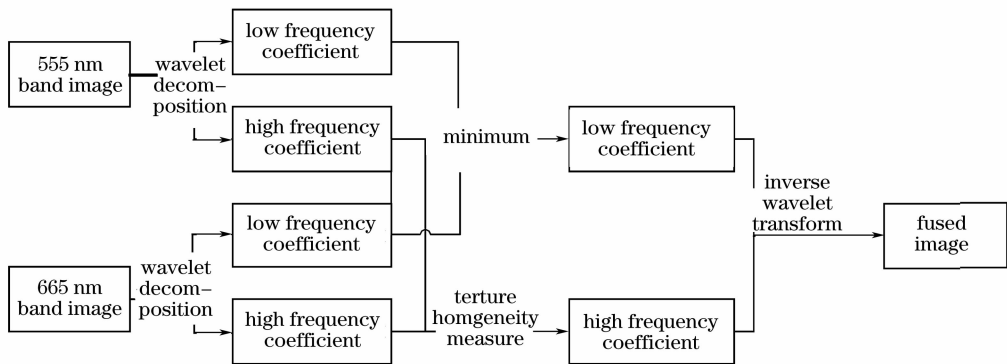


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm process

4 实验结果及评价

为了验证本算法的有效性, 使用一组 555 nm 波段和 665 nm 的航空偏振图像进行融合, 该图像是由航空多波段偏振 CCD 相机于 2003 年 12 月在

天津进行航空实验获取。图 3 中是 555 nm 波段和 665 nm 波段的两组融合图, 图 4 是用第一阶段所得的两幅融合图用小波区域一致性融合方法和小波纹理一致性融合方法分别进行融合所得结果。

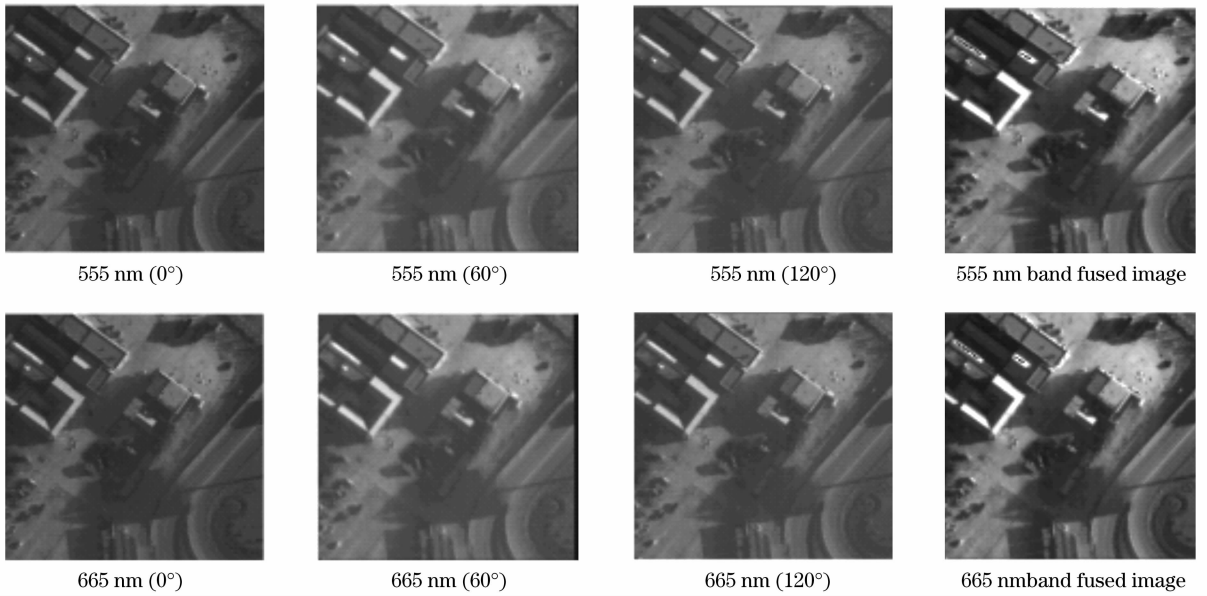


图 3 第一阶段融合结果
Fig. 3 Result in the first phase

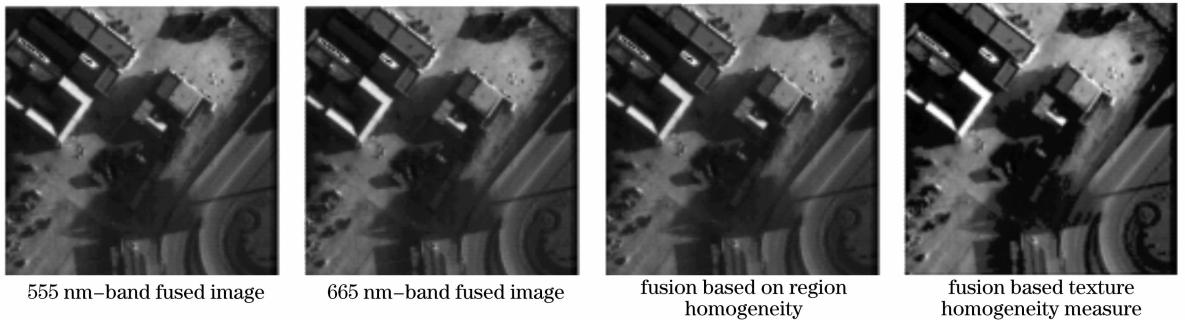


图 4 第二阶段融合结果
Fig. 4 Result in the second phase

从视觉效果上来看,基于小波变换纹理一致性测度的融合方法与基于小波变换区域一致性的融合方法在空间细节信息和光谱信息的表现能力上相当。除了进行目视比较外,为了能对融合图像质量进行定量的分析,本文采用了均值、方差、相关系数、平均交叉熵、均方根交叉熵以及联合熵等几个评价指标,结果如表 1 所示。均值和相关系数是对光谱信息畸变的度量,而方差和联合熵反映了影像信息量的大小。从信息量方面看,基于小波变换纹理一致性测度的融合方法保留了比基于小波变换区域一

致性的融合方法更多的空间信息;从光谱信息方面来看,基于小波变换纹理一致性测度的融合方法与基于小波变换区域一致性的融合方法相近,因为融合影像的空间分辨率和光谱分辨率不可能同时达到最佳的效果,由于纹理一致性测度的融合结果保留了更多的高频纹理信息,其光谱信息会产生较大的畸变。另外,常用平均交叉熵和均方根交叉熵的关键指标来评价两幅图像差异,它们直接反映了两幅图像对应像素的差异,差异越小,则融合方法从原始图像中提取的信息越多。

表 1 两种融合方法的定量分析和比较

Table 1 Quantitative analysis and comparison of two methods

Fusion method	Mean	Correlation coefficient	Variance	Unite entropy	Average cross entropy	Mean square root
Region homogeneity	80.19	0.9421	63.35	14.87	0.385	0.452
Texture homogeneity measure	81.35	0.9367	63.63	14.99	0.376	0.405

另外,可以发现常规区域一致性融合策略从三个方向对高频子图进行融合,保留了图像的细节,但是对整体性视觉效果考虑不多。本文提出的融合策略考虑了不同层次、不同分辨率、不同区域、不同方向的细节特征,将图像分为边缘区和平滑区,对不同类型区域采取不同的融合规则,既考虑了不同方向细节特点,使细节更加丰富和真实,又考虑了整体性视觉效果,所以融合效果较好。

5 结 论

算法在进行小波的基础上充分利用了偏振图像的边缘和纹理信息,将六幅不同波段、不同偏振角的图像进行两次融合,最后得到的融合图像具有较高的融合性能,尽可能地将待融合偏振图像的一些显著特征(如边缘、纹理)信息融入到一幅图像中。该方法由于采用窗口的融合策略,减少了预处理的要求,但是在运算时间上相对较长,不过可以通过选择窗口的大小进行改善。试验表明,该方法比传统的小波分解和基于区域一致的小波分解方法具有更好的融合效果。

参 考 文 献

- 1 Miranda A. Miller, Robert V. Blumer, James D. Howe. Active and passive SWIR imaging polarimetry[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4481**: 87~99
- 2 Frank Cremer, Wim De Jong, Klammer Schutte. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(5): 1021~1032
- 3 George P. Lemeshefsky. Multispectral multisensor image fusion using wavelet transforms[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3716**: 214~222
- 4 Shao Y, Guo H D. Macroscopical texture analysis and geology application effect of radar image[A]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1992
邵 芸, 郭华东. 雷达图像的宏观纹理分析和地质应用效果[A]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- 5 Tian Guang, Hong Jin, Sun Xiaobing *et al.*. Phase correlation algorithm and its application in registration of polarization images [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(3): 193~197
田 光, 洪 津, 孙晓兵 等. 相位相关法及其在偏振图像配准中的应用研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, **1**(3): 193~197
- 6 Chen Supeng, Tong Qingxi, Guo Huadong. *Study of Mechanism on Remote Sensing Information* [M]. Beijing: Science Press, 1998
陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- 7 Li Wenju, Liang Dequn, Wang Xinnian *et al.*. Segmentation method for car emblem based on texture homogeneity measure [J]. *Application Research of Computers*, 2004, **10**(21): 141~142
李文举, 梁德群, 王新年 等. 基于纹理一致性测度的汽车车徽分割方法[J]. *计算机应用研究*, 2004, **10**(21): 141~142