

# 基于 Contourlet 能量标准差积的 极化 SAR 图像融合

王贞俭

(鲁东大学图书馆情报技术部,烟台 264025)

**摘要** 针对 Contourlet 多尺度、多方向性的优点,以及单一特征量融合规则过于片面性的缺点,提出了一种结合 Contourlet 自适应阈值滤波的区域能量标准差积的多极化 SAR 图像融合算法。该方法利用 Sigmoid 函数构建一种自适应阈值函数来处理 Contourlet 的高频子带系数,实现融合前图像的去噪处理,然后在 Contourlet 域中完成不同极化 SAR 图像的信息融合。根据各子带系数的特性,对低频子带系数采用区域能量融合规则和加权算法;高频子带系数采用区域能量和标准差之积作为融合规则,进行选择融合。通过对实测极化 SAR 图像融合的试验表明,该算法在目视效果和客观评价指标方面比其他算法,都具有一定的优越性。

**关键词** SAR 图像融合 Contourlet 相干斑抑制 自适应阈值 特征量积融合规则算法

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)03-0514-06

## A polarization SAR Image Fusion Algorithm Based on the Product of Local Energy and Regional Standard Deviation in Contourlet Domain

WANG Zhen-jian

(Ludong University Library Information Technology Department, Yantai 264025)

**Abstract** With the advantage of Contourlet and the disadvantage of single feature fusion rules, a multi-polarization SAR image fusion algorithm, based on product of local energy and regional standard deviation, is proposed. First, an adaptive threshold method is adopted to preprocess the images. Then, multi-polarization SAR image fusion is implemented in Contourlet domain. According to the characters of Contourlet coefficients, local energy fusion rules and weighted averaging method is adopted for low-frequency sub-band fusion rules. The Product of regional energy and local standard deviation as a fusion rule is adopted for high-frequency sub-bands. The result of real multi-polarization SAR images fusion show that this algorithm can provide satisfactory fusion performance.

**Keywords** SAR image fusion, Contourlet, speckle reduction, adaptive threshold, feature product-based fusion rules

## 1 引言

遥感图像融合就是通过各种图像处理技术将同一地区的多源图像进行合成,消除多源信息之间的冗余,以获得更丰富、更真实、更清晰的遥感图像。传统的像素级遥感图像融合算法包括:基于加权平

均法和主成分分析(PCA)方法、色彩空间变换、基于神经网络的图像融合以及基于变换域的图像融合算法等等。近年来,基于小波变换的多尺度分析方法被广泛运用于遥感图像的融合处理中,并取得了成功。此类算法的主要思想是,首先对遥感图像进行小波变换,以提取图像的细节信息,然后对提取的细节信息直接或局部进行融合,最后得到融合图像。

收稿日期:2007-04-14;改回日期:2008-10-20

第一作者简介:王贞俭(1970~),女。鲁东大学通信信息系统专业硕士研究生。主要研究方向为现代信号处理理论及应用。

E-mail: jinyanxi2000@yahoo.com.cn

但小波图像融合技术所采用的小波函数<sup>[1]</sup>,只能获得水平、垂直和对角3个方向子带上的高频细节信息。而对于图像融合来说,频带划分的越细致,就越有利于在不同频带上采用不同的融合准则或者融合权值进行系数处理,提高处理的灵活性,增强图像的融合效果。

针对小波变换在图像处理中的缺陷,Do 和 Vetterli 提出了一种“真”2 维图像表示方法—Contourlet<sup>[2]</sup>。Contourlet 是在多尺度几何分析的思想下产生的一种新的图像处理工具。Contourlet 以曲线波为基本思想,具有抛物线尺度和各向异性结构,能够将图像分解成2的任意次幂个方向,产生更多方向的频率子带,从而更好地捕捉到图像中的精细纹理和细节,通过高维的表示方法来挖掘图像中的方向边缘信息。

基于变换域的融合算法,其融合规则及融合算子的选择仍是影响融合效果的关键因素。通常所采用的融合准则主要有两种:像素融合规则、区域单一特征量融合规则。由于单个像素和单一特征量并不能全面反应图像的区域特性,因此这两种融合规则都具有一定的片面性。基于上述两个方面,提出了基于 Contourlet 区域能量标准差积分极化 SAR 图像融合算法。利用小波系数加权融合算法、Contourlet 区域能量融合算法、Contourlet 区域归一化矩选择性融合算法<sup>[3]</sup>以及本文所提的融合算法,分别对实测的不同极化方式的 SAR 图像进行融合试验。试验结果表明,经本文算法融合后的图像纹理更清晰,综合两幅图像的信息量更大,定量的融合评价结果更优。

## 2 算法原理

在遥感图像进行融合处理之前,首先要对图像进行数据格式转换、几何配准、去相干斑、图像增强等预处理。由于本文所采用的融合图像是同一传感器、同一波段、同一入射角、相同分辨率,在不同的极化通道产生的,不同极化方式的 SAR 图像,因此待融合的数据不必进行数据格式转换和几何配准,只需对图像进行去相干斑和增强处理。为了确保在去相干斑的过程中更好地保持 SAR 图像中的纹理特征,提出了基于 Contourlet 的自适应阈值去噪算法。利用该算法分别对两组不同极化方式的 SAR 图像进行去噪预处理,最后将处理过的图像利用

Contourlet 区域能量标准差融合算法进行融合。

### 2.1 图像的 Contourlet 分解

Contourlet 通过 Laplacian (LP) 金字塔<sup>[4]</sup>与方向滤波器组 (DFB)<sup>[5]</sup>的结合来实现图像的多尺度和多方向分解。DFB 能够很好地捕捉信号的高频分量,但随着频率的分割,低频分量会“漏进”到若干个方向子带中,为了避免低频“漏进”的发生,应该在 DFB 之前先将低频分量移除。Contourlet 利用 LP 滤波器分离图像中的低频分量,对高频分量采用 DFB 分解。将 LP 滤波器与 DFB 结合就构成了 Contourlet 变换的核心——“塔式方向滤波器族”(PDFB)。

令  $I_0$  为输入图像,经过  $J$  尺度的 LP 分解之后,输出  $J$  个带通图像  $B_j (j = 1, 2, \dots, J)$  和一个低通图像  $I_J$ 。也就是说,第  $j$  个尺度的 LP 将第  $j-1$  尺度的低通图像  $I_{j-1}$  分解成一个低通的图像  $I_j$  和一个带通图像  $B_j$ ;带通图像  $B_j$  被第  $I_j$  尺度的 DFB 进一步地分解为  $2^j$  个带通方向子图像  $C_{j,k}^{(I_j)}$ , ( $k = 0, 1, \dots, 2^j - 1$ )。因此通过  $J$  个尺度的 PDFB 分解产生一个低通图像  $I_J$  和  $M (M = \sum_{j=1}^J 2^j)$  个带通方向子图像,PDFB 的分解可以在下一尺度的低通子带上迭代进行。每一尺度上的 DFB 分解都可以将图像分解成2的任意幂个方向子带。

### 2.2 Contourlet 自适应阈值相干斑抑制

在假设相干斑噪声为完全发育的前提下,强度或幅度图像经过对数变换之后,图像中的相干斑统计特性会随着视数的增加而趋近于高斯分布<sup>[6-7]</sup>。因此我们采用经过对数变换之后的加性噪声模型进行相干斑抑制。

基于 Contourlet 的相干斑抑制算法,其阈值的确定仍是关键所在。目前大多数的 Contourlet 阈值算法都是采用统一阈值方法,但由于经典的统一阈值算法对阈值的确定缺乏自适应性,容易模糊图像中的纹理细节信息,因此,本文采用一种基于 Sigmoid 函数<sup>[8]</sup>构建的新的自适应阈值函数来处理 Contourlet 系数。这种方法能够在去斑的同时,很好地保留图像中的纹理信息。

*sigmoid* 函数类似于神经网络中的激发函数,它是一个连续任意阶可导的 S 型函数。其表达式定义为

$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (1)$$

由 Sigmoid 函数构成的自适应阈值函数为

$$f(I) = aI_{\max} \left[ \text{sigmoid} \left( c \left( \frac{I}{I_{\max}} - b \right) \right) - \text{sigmoid} \left( -c \left( \frac{I}{I_{\max}} + b \right) \right) \right] \quad (2)$$

且

$$a = \frac{1}{\text{sigmoid}(c(1-b)) - \text{sigmoid}(-c(1+b))}$$

其中,  $I_{\max}$  为每一个 Contourlet 子带系数  $I$  绝对值的最大值,  $c = \lambda_1 \sigma$  和  $b = \frac{\lambda_2 \sigma}{I_{\max}}$  ( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为待选定的参数,  $\sigma$  为噪声方差)。

由于 sigmoid 函数的连续性, 使得由其构成的自适应阈值函数能够很好地克服硬阈值函数数学上不易处理的缺点, 同时也能减少人为的振荡现象。由于通过对输入图像的归一化, 使得  $a$ 、 $b$ 、 $c$  3 个参数设定不过分依赖于系数的大小, 有较大的动态范围。参数的动态调整使得自适应阈值函数能更好地保护 Contourlet 中较大的系数, 避免了统一阈值模糊图像细节的现象。

### 2.3 融合规则及融合算子的确定

由于 Contourlet 图像融合仍然是一种基于变换域的图像融合算法, 因此融合规则及融合算子的确定将直接影响融合的效果。目前有关小波系数的融合规则有很多, 归纳起来主要有两种: 一种是基于像素的融合规则, 即对融合图像之间同一位置对应的小波系数进行处理, 如比较常见的绝对值较大法、加权平均法等; 另一种是基于单一区域特征量的融合规则, 通过某个窗口模板 ( $3 \times 3$  或  $5 \times 5$ ) 在待融合系数上扫描, 确定区域中心像素的融合值。主要包括像素值、标准差、梯度、能量、熵<sup>[9]</sup>等。Contourlet 分解图像所产生的低频分量与小波的低频分量相似, 集中了图像的主要能量, 整体信息保持较好。且待融合的低频分量的相应区域数据值相同或相近。因此, 可采用小波的融合规则对 Contourlet 的低频分量进行融合。由于 Contourlet 的 DFB 在每一个尺度上能产生 2 的任意次幂的频率子带, 它的高频子带要比小波复杂得多, 而且由于频带划分的细致, 待融合的高频系数之间的差异性也很大, 这种差异性在纹理复杂的 SAR 图像的高频子带之间表现的更为明显。因此, 如果直接采用小波的融合规则进行融合, 会由于不考虑邻域像素相关性或图像局域特征表征不完整等因素, 导致边缘的敏感性过高, 使得最终融合后的图像细节模糊。

基于上述 2 个因素, 利用 Contourlet 进行 SAR 图像融合时, 对低融合规则和高频融合规则的确定如下:

#### (1) 低频融合算子

由于能量是低频分量中的一个显著特征, 因此本文采用区域平均能量加权算法进行融合。融合采用  $3 \times 3$  的窗口模板。

设  $I_V$  和  $I_H$  分别表示待融合的垂直极化和水平极化 SAR 图像,  $I'_V(i, j)$ 、 $I'_H(i, j)$  为它们的低频子带系数,  $I'_F(i, j)$  表示融合后的低频子带系数, 则

$$I'_F(i, j) = u_V I'_V(i, j) + u_H I'_H(i, j) \quad (3)$$

式中,  $u_V + u_H = 1$ ,  $u_V$  与  $u_H$  的比值为 2 个低频子带区域能量之比, 即

$$\frac{u_V}{u_H} = \frac{\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 I_V(i, j)}{\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 I_H(i, j)}$$

#### (2) 高频融合规则

考虑到 Contourlet 高频系数的显著差异性以及单一特征量融合准则的片面性, 采用区域特征量积作为高频系数的融合规则, 仍采用  $3 \times 3$  的窗口模板。由于能量和标准差是反应图像区域特征的 2 个主要特征量, 更能表征区域的特性, 因此采用能量和标准差的乘积来处理 Contourlet 的高频子带系数。具体的表达式如下:

$$K_{i,j}^d(X) = |E_{ij}(X) \times \text{std}_{ij}(X)| \quad (4)$$

式中,  $E_{ij}(X)$  表示第  $j$  个区域内以像素  $i$  为中心的区域能量,  $\text{std}_{ij}(X)$  表示第  $j$  个区域内方向子带的标准差。  $d = \{D_{HH}, L_j = 0, \dots, 2^j\}$  表示每一个高频方向子带。并根据判决门限, 采用选择性融合规则对系数进行融合。即

$$G_{ij}^d(I_F) = \begin{cases} G_{ij}^d(I_V) & K_{ij}^d(I_V) \geq K_{ij}^d(I_H) \\ G_{ij}^d(I_H) & K_{ij}^d(I_V) < K_{ij}^d(I_H) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $K_{ij}^d(I_V)$  和  $K_{ij}^d(I_H)$  分别为第  $j$  个区域内以像素  $i$  为中心的区域能量和标准差之积,  $G_{ij}^d(I_V)$  和  $G_{ij}^d(I_H)$  分别为垂直和水平极化 SAR 图像高频子带的像素值。

### 2.4 算法描述

(1) 首先利用 Contourlet 自适应阈值相干斑抑制算法对两个 HH 和 VV 极化方式的图像分别进行去噪增强处理。

(2) 将预处理后的两幅水平和垂直极化 SAR 图像分别记为  $I_V$  和  $I_H$ , 利用 Contourlet 分别对  $I_V$  和  $I_H$

进行  $L$  个尺度的分解,并在每一个尺度上生成  $2^j$ ,  $j = (0, 1, \dots, J)$  个高频子带和一个低频子带。

(3)对分解之后产生的 2 个带通子图像  $I'_V$  和  $I'_H$  采用区域平均能量加权算法进行融合,对两个高频方向子图像序列  $\{D_{VL}, L_j = 0, \dots, 2^j\}$  和  $\{D_{HL}, L_j = 0, \dots, 2^j\}$  采用区域能量和标准差积的融合规则进行融合处理。

(4)将融合得到的各子带信号进行相应的反变换,得到融合图像  $I$ 。

### 3 试验结果及分析

采用的试验数据是中国科学院遥感卫星地面站提供的反映上海市区的极化数据。该数据是由欧空局 ENVISAT-1 的 ASAR 在 C 波段的 Alternating Polarisation 模式下产生的 HH 和 VV 组合的极化数据。数据的获取时间是 2004 年 3 月 22 日,像元大小为  $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$ ,入射角为  $33.938 \text{ } 126^\circ$ ,中心经纬度分别为  $121.921^\circ$  和  $31.387 \text{ } 2^\circ$ 。从数据中提取上海浦东国际机场的周边地区,像素个数为  $512 \times 512$ 。

Lee 在文献[10]中曾经提出直接利用极化数据的强度或幅度格式,以实数值的方式进行图像处理。因此,采用单个极化图像的强度数据做图像融合试验。首先利用经典 Lee、Frost、GammaMap 滤波以及小波软阈值滤波(WST)与提出的 Contourlet 自适应阈值滤波(CAT)算法,进行比较试验。Lee 滤波、Frost 滤波、GammaMap 滤波所采用的滤波窗口大小为  $3 \times 3$ 。小波软阈值进行 2 个尺度的分解。Contourlet 的 LP 和 DFB 采用 9/7 滤波器,进行 5 个尺度的分解,且 5 个尺度的方向子带数量矩阵为  $[4 \ 4 \ 4 \ 8 \ 8]$ 。对 CAT 算法的仿真,高频方向子带系数采用自适应阈值函数进行处理。自适应阈值函数中的参数  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  在 4 个高频子带上的取值矩阵为  $[8 \ 9 \ 9 \ 10]$ 。利用几种算法滤波后的 VV 极化 SAR 图像,如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,采用提出的算法滤波后的图像视觉效果较好。为了定量分析算法的有效性,分别从等效视数(ENL)、方差、边缘保持度(ESI)和均值比等几个方面进行了比较。表 1 列出了几种算法的评价结果。

从表 1 中可以看出,本文算法的 ENL 最高,方差最小,边缘保持度相对较高,均值比也较接近 1,

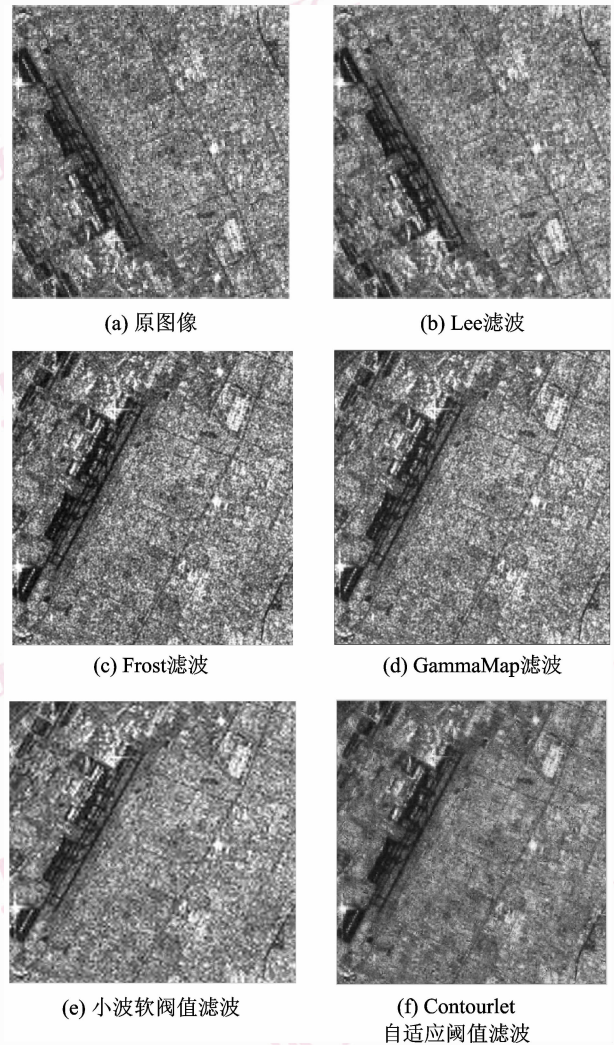


图 1 VV 极化 SAR 图像经几种去噪算法滤波后的效果图

Fig. 1 Comparison of denoising methods for VV polarization SAR image

因此采用 Contourlet 自适应阈值滤波对 HH 和 VV 极化 SAR 图像进行相干斑抑制。

表 1 几种算法的评价指标

Tab. 1 The evaluating indicator values of the filtered VV polarization SAR image

	ENL	方差	ESI	均值比
原图像	71.46	0.134	1	1
Lee 滤波	76.54	0.114	0.818	1.047
Frost 滤波	79.98	0.101	0.594	1.026
GammMap 滤波	89.93	0.097	0.576	1.102
小波软阈值滤波	101.8	0.081	0.457	0.971
本文算法	120.52	0.046	0.583	1.096

为了验证提出的融合算法的有效性,本文分别采用小波系数加权融合算法(WWF)、Contourlet 区域能量融合算法(CECF)、Contourlet 区域归一化矩选择性融合算法(CNMCF)和本文算法对滤波后的两组极化 SAR 图像进行融合试验。小波系数加权法中的权值为 0.5,小波变换采用 db8 小波,分解层数为 3。在基于区域的融合算法中,融合的区域大小为  $3 \times 3$ ,Contourlet 的分解层数为 3,每一尺度的方向子带数量矩阵为  $[4 \ 4 \ 8]$ ,LP 和 DFB 仍采用 9/7 滤波器。

以 ASAR 对上海浦东国际机场及周边地区的实测数据为例,对提出的融合算法与 WWF、CECF 和 CNMCF 算法进行分析、比较,结果如图 2 所示。

从图 2 给出的 SAR 图像融合结果可以看出,本文算法融合后的图像纹理更清晰,综合两幅图像的信息量更大。而其他几种的融合结果则相对较模糊。

本文分别采用标准差、熵、交叉熵和平均梯度对几种融合算法进行定量的分析比较。这几种融合评价指标分别从图像的清晰度、所包含的信息量等方面反映了融合图像质量。其中,标准差和平均梯度反映了图像的清晰度,值越大表示图像越清晰;熵反映了图像信息量的大小,熵值越大表明图像所包含的信息越多;交叉熵反映了两幅图像对应像素的差

异。交叉熵越小,表示两幅图像的差异越小,融合后的图像从原始图像提取的信息量就越大。几种融合算法的评价结果如表 2 所示。

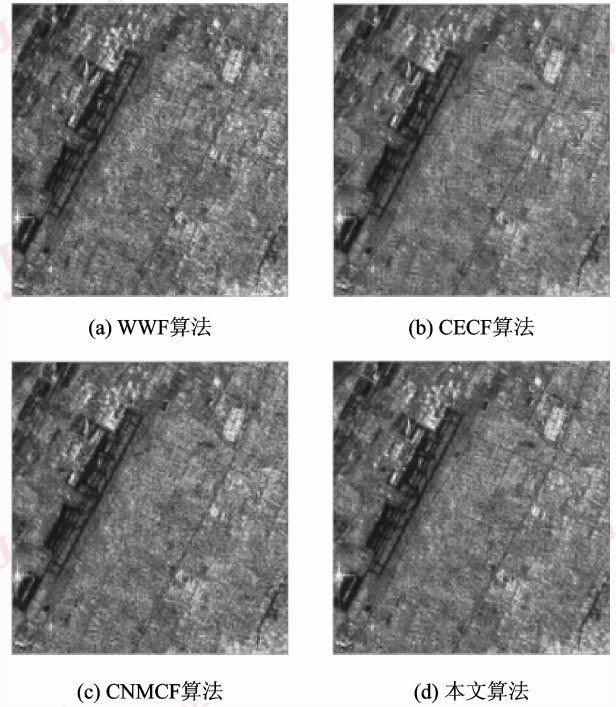


图 2 上海浦东机场 SAR 图像融合算法比较  
Fig. 2 Comparison of fusion methods for Shanghai Pudong airport SAR image

表 2 上海浦东机场极化 SAR 图像的几种融合算法评价指标

Tab. 2 The evaluating indicator values of Shanghai Pudong airport polarization SAR image fusion

	滤波后 HH 极化 SAR	滤波后 VV 极化 SAR	WWF	CECF	CNMCF	本文算法
标准差	0.173 5	0.174 4	0.154 3	0.161 5	0.170 1	0.180 9
平均梯度	0.022 4	0.021 5	0.012 8	0.018 3	0.024 6	0.028 8
熵	5.158 9	5.182 5	5.062 0	5.107 5	5.158 5	5.207 9
交叉熵			0.025 7	0.011 8	0.008 8	0.007 3

从评价指标可以看出,基于 Contourlet 的融合算法优于小波的融合算法。基于区域多特征量的融合算法要好于单一特征量的融合方法,其中,在多特征量融合算法中,本文算法的融合指标最优。

## 4 结 论

Contourlet 的多方向性和局部性的图像表示,能适应 SAR 图像纹理信息复杂的特点,能够更加完整

地提取 SAR 图像中的纹理特征。

通过对 Contourlet 和基于多分辨分析的小波融合算法深入分析研究,本文提出了一种基于区域能量标准差积的 Contourlet 多极化 SAR 图像融合算法。采用能准确、全面反映图像信息的能量和标准差的乘积作为高频 Contourlet 系数的融合规则。根据低频图像相似度较高的特点,将低频子带平均能量的比值作为加权系数进行加权融合。采用小波系数加权融合算法、Contourlet 区域能量融合算法、

Contourlet 区域归一化矩选择性融合算法和本文的算法对实测多极化 SAR 图像进行融合比较试验,结果表明,本文所提算法的图像目视效果和评价指标要优于其他算法。

### 参考文献 (References)

- 1 Ranchin T, Wald L. The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(3): 615-619.
- 2 Jiao Li-cheng, Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(12A): 43-50. [焦李成, 谭山. 图像多尺度几何分析: 回顾和展望[J]. *电子学报*, 2003, **31**(12A): 43-50.]
- 3 Gu Yan-feng, Zhang Ye, Zhang Jun-ping. Multiresolution remote sensing image fusion based on the normalized correlation moment [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, **7**(11): 1220-1224. [谷延锋, 张晔, 张俊萍. 基于归一化相关矩的多分辨率遥感图像融合[J]. *中国图象图形学报*, 2002, **7**(11): 1220-1224.]
- 4 Burt P J, Adelson E H. The laplacian pyramid as a compact image code [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, **31**(4): 532-540.
- 5 Bamberg R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images: theory and design [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, **4**(40): 882-893.
- 6 Arsenault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed [J]. *Journal Optical Society America*, 1976, **66**(11): 1160-1163.
- 7 Xie H, Pierce L, Ulaby F T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2002, **40**(3): 721-727.
- 8 Lain AF, Chuler S S, J Fan, *et al.* Mammographic feature enhancement by multiscale analysis [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1994, **13**(4): 725-735.
- 9 Tao Bing-jie, Wang Jing-ru. Overview of wavelet-analysis-based image fusion [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, **41**(25): 16-19. [陶冰洁, 王敬儒. 采用小波分析的图像融合方法评述[J]. *计算机工程与应用*, 2005, **41**(25): 16-19.]
- 10 Lee J S, Grunes M R, Mango S A. Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, **29**(4): 535-544.