

基于双树复小波变换的相位保持 SAR 图像降噪

周伟华^{1),2)} 王鑫¹⁾ 罗斌¹⁾

¹⁾(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室,合肥 230039) ²⁾(华东电子工程研究所,合肥 230031)

摘要 为更有效地抑制噪声,提出了一种基于非正交复值 log-Gabor 小波变换的 SAR 图像斑点噪声消除算法。该算法通过相位保持消噪的门槛操作确保相位信息不受破坏。由于用单一的乘性模型或加性模型消除 SAR 图像的斑点噪声都不能取得很好的效果,为此使用具有平移不变性及更多方向选择性的双树复小波变换图像融合算法,通过选择适当的融合规则,使乘性和加性噪声模型优势互补,就能有效抑制斑点噪声。实验结果显示,这种消噪方法与其他方法相比,有明显优势。

关键词 SAR 图像斑点噪声 噪声模型 相位保持 双树复小波变换 图像融合

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)05-0805-06

DT-CWT Based Phase Preserving Algorithm for SAR Image Despeckling

ZHOU Wei-hua^{1),2)}, WANG Xin¹⁾, LUO Bin¹⁾

¹⁾(The Key Laboratory of IC&SP of Anhui University, Hefei 230039) ²⁾(East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031)

Abstract In this paper, a despeckling method is proposed for synthetic aperture radar (SAR) images. The method improves the phase preserving method using the non-orthogonal, complex valued, log-Gabor wavelets. Threshold of the wavelet responses in the complex domain ensures the important phase information in the image is not corrupted. The multiplicative and additive speckle noise components play an important role in SAR images, but separately using the two models cannot result in satisfactory despeckling. The shift invariant dual tree complex wavelet transform (DT-CWT) is used which has an increased directional sensitivity. A wavelet-based image fusion method is developed based on the DT-CWT. Expected denoising performance is achieved through a well-chosen fusion scheme. Experimental results demonstrate that our method outperforms several other despeckling methods such as Frost filtering, Kuan filtering, Lee filtering and median filtering on the test images.

Keywords SAR image speckle, noise model, phase preserving, dual tree complex wavelet transform (DT-CWT), image fusion

1 引言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 图像在遥感、军事以及国民经济的各个领域都有广泛的应用,但其固有的斑点噪声降低了图像的空间分辨率,严重破坏了视觉效果,隐藏了图像的精细结构,使其可解译性变差,严重制约了其进一步的

应用^[1]。

由于小波变换所固有的多分辨率分析特性和良好的时域频域局部特性,使其在 SAR 图像消噪上具有突出优越性^[2,3]。在类似于傅里叶变换等变换域处理过程中常常可以分离出图像的幅值和相位信息,而一般的小波消噪只注重幅值信息而忽略相位信息,复数小波变换中的阈值操作能确保图像的相位信息不受破坏^[4,5]。SAR 图像中的斑点噪声不仅包含有乘

基金项目:国家自然科学基金项目(60374044);安徽省人才开发基金项目(2001Z021)

收稿日期:2005-12-08;改回日期:2006-03-06

第一作者简介:周伟华(1976 -),男,1998年和2006年分别于合肥工业大学和安徽大学获得学士、硕士学位,工程师。主要研究方向为计算机视觉、图像处理等。E-mail: weihua760124@163.com

性噪声还包含有加性噪声,多数研究者从简化问题出发,将其简化为乘性噪声模型^[6],然而加性噪声往往不可忽略。基于上面这些基本认识,本文从理论分析出发,提出了一种新的降噪算法,应用了具有平移不变性及更多方向选择性的双树复小波变换图像融合技术。文章最后将该算法的处理结果与经典的 Frost 滤波、Kuan 滤波、Lee 滤波、中值滤波消噪的结果做了比较,该算法整体视觉效果好,主要特征突出,边缘分明,细节纹理丰富,具有明显的优势。

2 双树复数小波变换

Kingsbury 提出在同一个数据上,用两个独立的小波变换平行作用来完成复数小波变换,即 $\varphi(t)$ 由如下公式计算^[7]:

$$\varphi(t) = \varphi_h(t) + i\varphi_g(t) \quad (1)$$

其中, $\varphi_h(t)$, $\varphi_g(t)$ 均是实数值小波。1 维双树复数小波变换(1D DT-CWT)如图 1 所示。

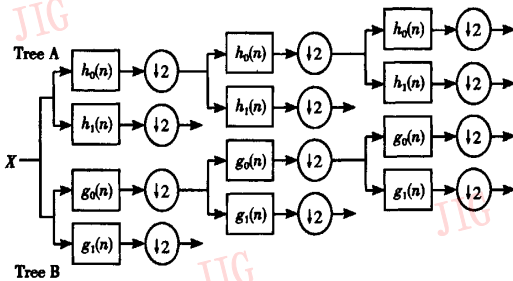


图 1 1 维双树复小波变换
Fig. 1 1D DT-CWT

1 维双树复数小波变换可通过一对滤波器组同时作用在输入数据上来实现。它包含两个平行的小波树,即树 A(Tree A)和树 B(Tree B)两个分支,如图 1 所示的上部树 A 的叠加滤波器组表示复数小波变换的实部;下部树 B 的叠加滤波器组表示复数小波变换的虚部, $\downarrow 2$ 表示隔点取样。其中,实数滤波器 $h_0(n)$, $h_1(n)$ 和 $g_0(n)$, $g_1(n)$ 分别代表了两个共轭正交滤波器对。则与滤波器对 $h_0(n)$, $h_1(n)$ 相对应的实数值尺度函数 $\phi_h(t)$ 和小波函数 $\varphi_h(t)$ 定义如下:

$$\phi_h(t) = \sqrt{2} \sum_n h_0(n) \phi_h(2t - n) \quad (2)$$

$$\varphi_h(t) = \sqrt{2} \sum_n h_1(n) \phi_h(2t - n)$$

而与滤波器对 $g_0(n)$, $g_1(n)$ 相对应的实数值尺度函数 $\phi_g(t)$ 和小波函数 $\varphi_g(t)$ 则定义如下:

$$\phi_g(t) = \sqrt{2} \sum_n g_0(n) \phi_g(2t - n) \quad (3)$$

$$\varphi_g(t) = \sqrt{2} \sum_n g_1(n) \phi_g(2t - n)$$

复数小波变换的优点源于复数小波函数 $\varphi(t)$ 的频谱单边性,双树复数小波变换的关键是低通滤波器的设计,具体设计方案参考文献[8]。

3 基于 log-gabor 滤波器复小波变换的相位保持滤波

Oppenheim and Lim 所做的工作说明^[4],对于人的视觉系统来说,在傅里叶变换中,图像的相位信息极为重要。幅值谱表明各分量出现的多少,而相位谱则表明各分量在图像中出现的位置,因此相位信息蕴含着图像的形状和结构信息。正因如此,我们期望在对 SAR 图像的降噪过程中,提取原始图像的相位信息,并保证其在消噪的处理中不被破坏^[4,5]。采用基于奇偶滤波器组的两个独立的小波变换完成双树复小波变换来实现上述构想。由于 log-Gabor 所具有的良好性能:(1)在对数频率刻度,具有高斯传输函数;(2)奇滤波器在任意带宽保持 0 直流分量;(3)可以使得信号特征的小波系数分散程度达到最小,从而使得信号能量局限在少数系数当中,使得消噪效果达到最好^[4,9]。Log-Gabor 偶、奇对称小波示于图 2。

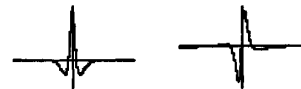


图 2 log-Gabor 偶奇对称小波
Fig. 2 Even and odd log-Gabor wavelets

Peter Kovesi 指出,实验证明基于 log-gabor 滤波器复小波变换的相位保持滤波算法对于加性高斯噪声滤除具有良好效果。

4 复合噪声模型及滤波方法

4.1 斑点噪声模型

当斑点噪声不是完全发展的情形时,不可以用单一乘性噪声模型对其做出准确描述^[10]。记 $I(x, y)$ 为一含噪 SAR 图像, $S(x, y)$ 为待估计的真实图像, $\eta_m(x, y)$ (下角 m 代表乘性) 和 $\eta_a(x, y)$ (下角 a 代表加性) 表示乘性和加性噪声分量,有:

$$I(x, y) = S(x, y) \cdot \eta_m(x, y) + \eta_a(x, y), (x, y) \in Z^2 \quad (4)$$

如果忽略乘性噪声分量可得:

$$I(x, y) = S(x, y) + \eta_n(x, y) \quad (5)$$

SAR 图像中的加性噪声服从高斯分布。忽略加性噪声分量可得:

$$I(x, y) = S(x, y) \cdot \eta_m(x, y) \quad (6)$$

对图像的灰度值作对数变换,则乘性噪声转换为加性高斯噪声^[6]:

$$\log I(x, y) = \log S(x, y) + \log \eta_m(x, y) \quad (7)$$

对于一幅真实的 SAR 图像,我们难以将加性噪声、乘性噪声分离开来,一般都是取近似乘性噪声模型进行处理。通过研究发现,加性噪声的影响是不可忽略的,因此提出了综合这两种模型优势的新算法。

4.2 基于双树复小波融合技术改进相位保持滤波方法

基于相位保持滤波算法和斑点噪声模型,提出新的消噪方法:先对原图直接应用相位保持消噪,得到 I_1 ;然后对原图做对数变换后应用相位保持消噪,并做逆对数变换,得到 I_2 ;最后融合 I_1, I_2 。

小波变换在很多图像融合问题中,得到了成功的应用,一般采用离散小波变换技术(discrete wavelet transform, DWT),它比金字塔方案有更多优点,但它存在一个主要缺点就是没有平移不变性。双树复小波变换(DT-CWT)具有近似平移不变性^[11],同时比离散小波变换具有更多的方向选择性,它在每层可以得到 $\pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ$ 六个方向的细节信息。由于采用双正交基,可以得到完美的重构。通过双树复小波变换获得一个输入图像的多分辨率分解,两幅图像的小波分解系数通过一定的融合规则融合,产生与融合后图像相对应的一组小波系数,整个过程示于图 3。

关于复小波融合算法的融合规则主要有 3 种:(1)最大选择(MS)方案;(2)加权平均(WA)方案;(3)加窗选择(WBV)方案。相关文献有详细介绍^[12],此处限于篇幅不复赘述。

本文采用的方案是:首先取得双树复小波分解的复系数模值,概貌系数模值选用加权平均方案,这样就可以有效消除灰度失真,因为图像做小波分解后,大的结构也即主要能量集中在概貌系数里,由于加性噪声对数变换后滤波对大框架结构有突出效果,可以对其选择较大权值。高频系数模值采用最大选择方案,因为真正信号的能量总是集中在少数小波分解系数上,相对能量较大,系数幅度大;而噪声能量总是均匀分布在整个尺度空间能量分散,系数幅度小,所以采用最大选择方案,可以提取真正的

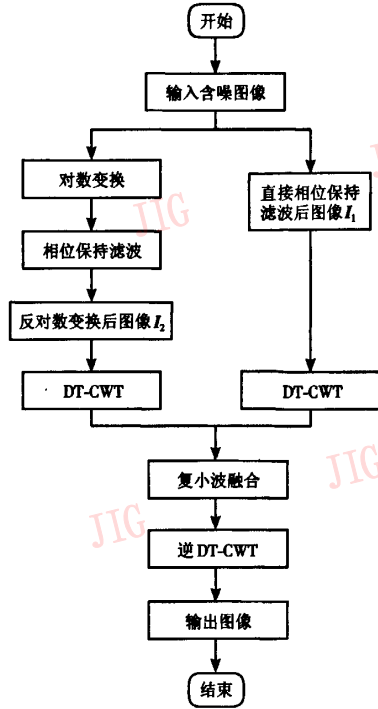


图 3 基于双树复小波融合技术改进的相位保持滤波算法
Fig. 3 Improved DT-CWT based phase preserving algorithm

高频细节,滤除噪声分量。

5 消噪效果定量评价准则

为了对新算法在边缘保持、细节保持、平滑区域的平滑能力方面有一个直观、定量的概念,首先模拟一幅含有乘、加性混合噪声的 SAR 图像做一个仿真分析实验,然后在一幅真实 SAR 图像上进行实验。

对模拟图像,通常采用两个评价指数,称之为平滑指数(FI)和边缘保持指数(ESI)^[13]。前者指滤波处理后各个区域所有像元的均值 μ_i 与其标准差 σ_i 的比值,它表征各滤波器对图像的平滑能力,FI 值愈高,表示平滑能力愈强,其表达式为

$$FI = \mu_i / \sigma_i \quad (8)$$

ESI 表征滤波处理后对图像边缘的保持能力,值愈高,意味着边缘保持能力愈强,其表达式为

$$ESI = \frac{\sum_{i=1}^m |DN_{x_1} - DN_{x_2}|_{\text{原始图像}}}{\sum_{i=1}^m |DN_{x_1} - DN_{x_2}|_{\text{滤波后图像}}} \quad (9)$$

式中, m 是所选定的边缘像素个数; DN_{x_1} 和 DN_{x_2} 分

别是边缘像素两边选择的处理区域 R_1, R_2 的像素灰度值。

对于真实 SAR 图像,常用的评估指标有:图像均值、图像标准方差、等效视数和边缘保持指数。图像均值是整个图像的平均强度,它反映了图像的平均灰度,即图像所包含目标的平均后向散射系数。图像方差代表了图像区域中所有点偏离均值的程度,它反映了图像的不均匀性。

图像的均值和方差反映图像整体特征的指标,一般情况下,如果地表植被不同,图像区域中的地表差异大,人工目标多,图像的灰度值变化越大,图像方差也就越大。

等效视数:等效视数 (ENL)^[6]是衡量一幅 SAR 图像斑点噪声相对强度的一种指标,其定义为

$$ENL = \frac{E^2(\hat{R})}{\text{var}(\hat{R})} \quad (10)$$

式中, $E(\hat{R})$ 和 $\text{var}(\hat{R})$ 分别为 SAR 图像中一块区域 \hat{R} 的均值和方差。等效视数表征图像上斑点的强弱程度,等效视数越大,表明图像上的斑点越弱,可解释性越好。

边缘保持指数 (FOM)^[9] 定义为

$$FOM = \frac{1}{\max(N_A, N_f)} \sum_{i=1}^{N_A} \frac{1}{1 + d_i^2 \alpha} \quad (11)$$

式中, N_A 是噪声图像边缘图中包含的非零像素数, N_f 是消噪后图像边缘图中包含的非零像素数, d_i 是噪声图像中第 i 个边缘像素与滤波后离它最近的边缘像素之间的几何距离 (欧氏距离), α 表示惩罚因子,本文选择 $\alpha = 1/9$ 。理想处理结果应该是 $FOM = 100\%$ 。

6 实验结果及分析

6.1 新算法的仿真实验分析

模拟一幅含有边缘及一个像素宽度的线条的图像,加入 0 均值、标准差均为 $\sigma = 0.125$ 的乘性、加性高斯噪声 (如图 4(a) 所示)。采用对数变换相位保持消噪、直接相位保持消噪、Frost 滤波、Kuan 滤波、Lee 滤波^[14,15]、中值滤波方法进行消噪,消噪结果见图 4。采用文中第 5 节的模拟图像通常采用的两个评价指数对滤波结果做细致分析,相关数据列于表 1,表中还给出了对于线条保持能力的定性描述。

从图 4 及表 1 都可以看出,本文算法仅在 ESI 数据上略逊于 Frost、Kuan 和 Lee 滤波器,其他各项指标尤其是对细节的保持能力均要优于其他方法,

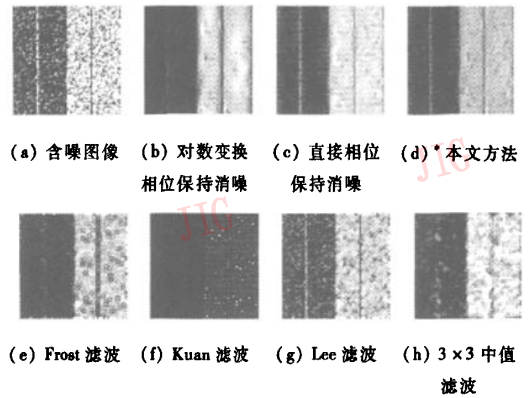


图 4 仿真实验结果

Fig. 4 Results of simulation testing

表 1 各算法仿真实验结果评价比较

Tab.1 Comparison of the experimental results on synthetic images

	ESI	FI	白色线条	黑色线条
图 4(b)	1.09	0.86	很差	变粗
图 4(c)	1.20	1.27	好	较好
图 4(d*)	1.21	1.29	好	好
图 4(e)	1.25	0.77	极差	变粗
图 4(f)	1.24	0.74	无线条	无线条
图 4(g)	4.31	0.56	间断	间断
图 4(h)	1.14	0.60	极差	极差

而且视觉效果也比较好的。

6.2 真实 SAR 图像实验分析

取图 5 所示的某地一运动场的机载 SAR 图像对本文提出的算法以及各类已有的方法做一个深入



图 5 某地一运动场的机载 SAR 图像

Fig. 5 An example SAR image of playground

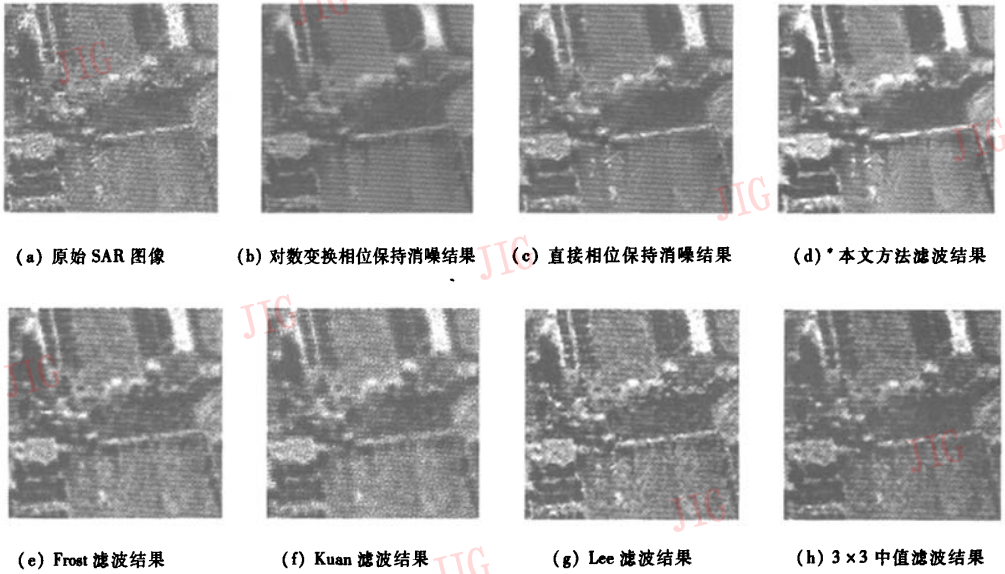


图 6 SAR 图像降噪试验结果及与其他方法的比较

Fig. 6 Results of various despeckling methods

细致的比较,使用的定量评估指标见文中第 5 节。

首先来看视觉效果。为深入分析对数变换与否在实际 SAR 图像降噪中的影响,我们取原图右上角 128×128 的一块,做了 7 种降噪处理,其结果如图 6 所示。从对斑点噪声的抑制及改善视觉效果来说,图 6(b)、图 6(c)、图 6(d) 均较理想;图 6(b) 平滑区域噪声滤除效果较好,但有一定过滤波现象,弱化了细节和边缘;图 6(c) 对线条特征及细节有较强的突出能力,处理结果特征丰富,但在平滑的亮区产生褶皱效应,严重破坏视觉效果;而本文的方法整体视觉效果好,主要特征突出,边缘分明,细节纹理丰富,做到了融合图 6(b)、图 6(c) 的优势,消除其劣势。

而图 6(e) Frost 滤波、图 6(f) Kuan 滤波、图 6(g) Lee 滤波和图 6(h) 3×3 中值滤波,这些在滤波领域比较经典的算法得到的滤波图像上的斑点噪声看起来依然很明显,视觉效果不好。

接下来,在图 5 所示原 SAR 图像上选取两块区域进行滤波效果的定量研究。A 区域比较均匀,用来研究算法的平滑程度;B 区域存在细节和边缘,用来研究算法对图像边缘和细节的保留程度;计算结果列于表 2 和表 3;表中第 1 列字母标号与图 6 对应。

从表中可看出,各种滤波算法的有效视数都有所提高,表明都起到了去斑和平滑作用。对于区域 A, ENL 值愈高, FOM 值愈低,其平滑能力愈强,降噪

表 2 各算法实验结果评价比较(区域 A)

Tab. 2 Comparison of different despeckling methods(Region A)

A 区	均值	标准差	ENL	FOM (%)
图 6(a)	46.73	25.43	3.38	
图 6(b)	27.72	3.25	72.60	83.66
图 6(c)	41.47	3.80	119.26	83.28
图 6(d*)	46.30	3.44	135.25	81.07
图 6(e)	51.81	12.79	16.41	91.35
图 6(f)	53.69	20.06	7.16	86.01
图 6(g)	52.89	15.07	12.32	93.08
图 6(h)	44.19	12.75	12.02	88.47

表 3 各算法实验结果评价比较(区域 B)

Tab. 3 Comparison of different despeckling methods(Region B)

B 区	均值	标准差	ENL	FOM (%)
图 6(a)	56.78	58.19	0.95	
图 6(b)	31.84	27.68	1.32	94.67
图 6(c)	56.11	38.61	2.11	94.96
图 6(d*)	54.37	34.64	1.71	96.71
图 6(e)	53.56	42.27	1.61	93.80
图 6(f)	55.58	47.74	1.36	91.47
图 6(g)	60.27	50.92	1.40	97.42
图 6(h)	48.62	39.39	1.52	95.33

效果愈好,本文 A 区 ENL 值高出一些传统方法十几倍,据此可以认为本文方法在均匀区域消除噪声的效果最好。区域 B 不规则的地物导致散射面的不均匀,存在丰富的边缘和细节,ENL 值应该相对较小,FOM 较高,从表 3 可以看出本文算法 ENL 值尽管不是最小,但与其他方法相比差别不大,FOM 值仅低于 Lee 滤波算法。引人注目的是,本文算法的 ENL 值在两个不同的区域差别最大,亦即区分这两类地表的能力方面是最强的;而一些传统算法的区分能力却较差。综合各项指标来看,我们提出的算法具有明显的优势。

7 结 论

基于复数小波变换的相位保持算法对于加性高斯噪声具有很好的滤除能力,但由于 SAR 图像的 speckle 噪声是乘性加性噪声混叠而成,无论是对原图做对数变换与否,原始的相位保持算法都不能达到理想效果。本文分析了小波变换图像融合算法的原理,利用乘性加性噪声模型的各自优势,提出了一种新的 SAR 图像降噪算法,对斑点噪声抑制取得很好效果,对边缘、线条及细节特征得到极好保持,比传统滤波方法效果更好。应该指出,本算法的研究还有待在 SAR 图像的后续应用如分类、识别等方面得到进一步的检验和完善。

参考文献 (References)

- 1 Goodman J W. Some fundamental properties of speckle[J]. Journal Optical Society America, 1976, 66(11): 1145 ~ 1150.
- 2 Guo H, Odegard J E, Lang M, et al. Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R [A]. In: Proceedings of First International Conference on Image Processing [C], Rice University, Houston, TX, USA, 1994, 1: 75 ~ 79.
- 3 Imola K Fodor, Chandrika Kamath. Denoising through wavlet shrinkage: An empirical study [R]. Center for Applied Science Computing Lawrence Livermore National Lab., July 27, 2001.
- 4 Oppenheim A V, Lim J S. The importance of phase in signals[J]. In: Proceedings of The IEEE, 1981, 69(5): 529 ~ 541.
- 5 Peter Kovesi. Phase Preserving Denoising of Images [A]. In: Proceedings of the Australian Pattern Recognition Society Conference: DICTA '99[C], Perth, WA, USA, 1999: 212 ~ 217.
- 6 Alin Achim, Panagiotis Tsakalides, Anastasios Bezerianos. SAR image denoising via bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(8): 1773 ~ 1784.
- 7 Kingsbury N G. The dual tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters [A]. In: Proceedings of 8th IEEE Digital Signal Processing Workshop [C], Bryce Canyon, Utah, USA, 1998: 86 ~ 89.
- 8 Selesnick I W. Hilbert transform pairs of wavelet bases [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001, 8(6): 170 ~ 173.
- 9 Field D J. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(12): 2379 ~ 2394.
- 10 Maitre Henri, Sun Hong (Tr.). Synthetic Aperture Radar Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. [麦特尔 (Maitre H.) 编, 孙洪等译. 合成孔径雷达图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.]
- 11 Kingsbury N. The dual-tree complex wavelet transform with improved orthogonality and symmetry properties [A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Image Processing [C], Vancouver, Canada, 2000, 2: 375 ~ 378.
- 12 Kingsbury N. The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters [A]. In: IEEE Digital Signal Processing Workshop [C], Vancouver, BC, Canada, 1998, 86: 86 ~ 89.
- 13 Liu Yong-chang, Zhang Ping, Yan Wei-dong, et al. Restrain speckle noise of SAR image based on wavelet package threshold method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(3): 160 ~ 167. [刘永昌, 张平, 严卫东等. 小波包阈值法去除合成孔径雷达图像斑点噪声 [J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 160 ~ 167.]
- 14 Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1982, PAMI-4(2): 157 ~ 166.
- 15 Min Dai, Cheng Peng, Andrew K, et al. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1642 ~ 1648.