激光主动成像图像噪声抑制方法

吴 坤,张合新,孟 飞,陈 聪

(第二炮兵工程大学 控制工程系,陕西 西安 710025)

摘 要:针对激光主动成像图像特点及实际应用需要,提出了一种基于同态滤波与双数复值小波变换级联的图像降噪算法。首先通过同态滤波将乘性散斑噪声变换为加性噪声;然后用基于改进 Q-shift 滤波器的双树复值小波对含噪图像进行分解,通过 Bayes 自适应阈值法修正小波系数;最后再进行相应的逆变换得到去噪图像。该算法具有近似平移不变性、多方向选择性及精确重构性,采用信噪比(SNR)、峰值信噪比(PSNR)和运行时间作为算法去噪性能的评价标准进行实验。实验结果表明该算法能够有效抑制图像中的散斑噪声,计算效率高,且很好地保护了图像细节。

关键词:激光主动成像; 图像去噪; 双树复值小波变换; Q-shift 滤波器

中图分类号:TP958.58 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)09-2397-06

Denoising method of intensity image for laser active imaging system

Wu Kun, Zhang Hexin, Meng Fei, Chen Cong

(Department of Automation, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: According to the characteristics of laser active imaging and practical application, a new image denoising algorithm based on homomorphic filtering and dual tree complex wavelet transform (DTCWT) was proposed. Firstly, speckle noise was converted from multiplicative noise to additive noise by homomorphic transform. Secondly, the noise image was decomposed with the Q-shift DTCWT, then wavelet coefficients were revised by Bayes adaptive threshold method. Finally, inverse transforms were carried out and the denoised intensity image was obtained. The algorithm proposed had approximate shift-invariant, good directional selectivity and perfect reconstruction. The image signal to noise ratio (SNR), peak signal to noise ratio (PSNR) and the run time were applied to estimate the denoising effect. Experimental results show that the proposed algorithm has advanced denoising performance in laser active imaging and great efficiency in computation. Meanwhile, the detail of image is well protected.

Key words: laser active imaging; image denoising; dual tree complex wavelet transform; Q-shift filter

收稿日期:2013-01-06; **修订日期**:2013-02-14

基金项目:武器装备预研项目

作者简介:吴坤(1987-),男,硕士生,主要从事激光主动成像末制导的研究工作。Email:lieutenant@vip.qq.com

导师简介:张合新(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事导航、制导与控制方面的研究工作。Email:f301301@126.com

0 引 言

近年来迅速发展起来的激光主动成像技术,是激光主动成像制导的关键技术之一,与激光半主动制导技术相比,主动成像技术能提供更加稳定清晰的目标图像,为准确描述目标几何形状提供更丰富的信息,在目标探测、雷达侦察、精确制导等军事领域具有重要的实用价值和广泛的应用前景[1]。在实际中由于激光器照度不均、大气后向散射、成像系统自身等因素都会引入噪声,从而影响激光主动成像图像的质量,以及实时成像速度,最终影响到主动成像制导的精度。因此,研究激光主动成像图像的降噪算法非常必要。

经典的抑制噪声算法有 Lee 滤波[2],Kuan 滤波[3]和 Frost 滤波[4]等,经典算法在去除噪声的同时,也会增宽图像特征结构,使图像边缘和细节变得模糊。针对激光主动成像强度像,李晓峰[5]和许毅玢[6]分别提出了基于小波变换的去噪方法,小波变换能够克服经典滤波的缺陷,很好地保护图像边缘,但是对噪声的压缩能力不够,且不具有平移不变性。为此,文中在参考文献[7]和[8]的基础上,提出将同态滤波和双树复值小波变换 (Dual Tree Complex Wavelet Transform,DTCWT)级联的图像降噪算法,能够有效抑制图像中的散斑噪声,很好地保护图像细节信息。

1 双树复值小波变换

DTCWT 是通过两个临界采样的平行小波变换作用来实现的[8],一维 DTCWT 如图 1 所示,采用了二叉树结构的离散小波变换,上半部分离散小波变换子信号生成变换的实部,下半部分生成变换的虚部。

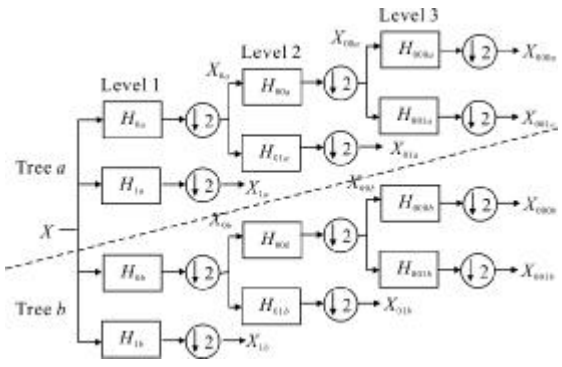


图 1 一维双树复值小波变换

Fig.1 1D DTCWT

一维DTCWT 可以通过公式(1)分解出信号:

$$\mathbf{x}(t)=\sum \mathbf{u}_{j0}\,\phi_{j0}(t)+\sum_{j\leqslant j0}\sum \mathbf{c}_j\,\varphi_j(t)$$
$$\phi_{j0}=\phi_{j0}^{r}+i\phi_{j0}^{i} \tag{1}$$
$$\varphi_j=\varphi_j^{r}+i\varphi_j^{i}$$

式中:j 为分解层数;ϕ_{j0} 和 φ_j 分别为径向函数和小波函数;$\mathbf{u}_{j0}$ 和 $\mathbf{c}_j$ 分别为粗略系数和精确系数。$\{\phi_{j0}^{r},\phi_{j0}^{i},\varphi_j^{r},\varphi_j^{i}\}$都是实数,$\{\mathbf{H}_{0a},\mathbf{H}_{1a}\}$和$\{\mathbf{H}_{0b},\mathbf{H}_{1b}\}$分别为实部和虚部小波滤波第一层分解滤波器组,每层滤波器都做因子为 2 的采样,如果实虚两部分每层滤波器长度奇偶相间,那么它们之间恰好相差一个周期的采样间隔,在分解时虚部采样就能够得到实部采样丢失的值。

二维复值离散小波变换按照公式(2)定义,可以产生一个带通图像:

$$\mathbf{x}(p)=\sum \mathbf{u}_{j0}\,\phi_{j0}(p)+\sum_{\mathbf{b}\in\beta}\sum_{j\leqslant j0}\sum \mathbf{c}_j^{\mathbf{b}}\,\varphi_j^{\mathbf{b}}(p) \tag{2}$$

式中:$\mathbf{x}(p)$为假设的图像,$p=(\mathbf{p}_1,\mathbf{p}_2)$,其他定义与公式(1)相同。二维 DTCWT 是由一维 DTCWT 扩展的,对一维 DTCWT 中列滤波输出再进行行滤波器复共轭滤波,由此每级变换都可以得到 2 个低频部分和 6 个高频部分,6 个高频细节方向分别为 $\beta=\{15°,45°,75°,15°,-45°,-75°\}$,一维和二维 DTCWT 关系如公式(3)所示(表示共轭):

$$\varphi^{15°}(p)=\phi(p_1)\varphi(p_2)$$
$$\varphi^{45°}(p)=\varphi(p_1)\varphi(p_2)$$
$$\varphi^{75°}(p)=\varphi(p_1)\varphi(p_2)$$
$$\varphi^{-15°}(p)=\varphi(p_1)\varphi^{*}(p_2)$$
$$\varphi^{-45°}(p)=\varphi(p_1)\varphi^{*}(p_2)$$
$$\varphi^{-75°}(p)=\varphi(p_1)\varphi^{*}(p_2) \tag{3}$$

双树结构的设计以及多个方向的子带信息,使 DTCWT 兼具近似平移不变性和良好的方向选择性。但是上述滤波器长度奇偶相间的设计使运算量增多,而且只有在滤波器长度较长时才能达到较好的效果,这使算法的整体效果受到影响,因此,设计和选取双树结构对应的滤波器是十分关键的环节。

2 DTCWT 滤波器的设计

为了能在保证DTCWT 近似平移不变性和良好的方向选择性的基础上,同时提升运算效率,在滤波器设计时需满足以下性质:

(1) 近似半个采样周期的延迟,以保证近似平移不变性。

(2) 对小波系数能够精确重构。

(3) 有限支撑(有限脉冲响应滤波器)。

(4) 良好的衰减带或消失矩。

能够满足以上性质的滤波器设计方法主要包括:线性相位双正交方法、Quarter-shift(Q-shift)方法以及公因子方法[9-10],但第一种和第三种方法有严格的约束条件,实现难度比第二种方法大。文中从算法效率的角度出发, 采用基于 Q-shift 滤波器方法的 DTCWT,其基本原理如下。

令第一层滤波器为奇数长度, 以后所有滤波器均为偶数长度,并满足:

$$\mathbf{h}_b=\mathbf{h}_a(\mathbf{N}-1-\mathbf{n}) \tag{4}$$

式中:$\mathbf{N}$ 为 $\mathbf{h}_a(\mathbf{n})$的长度,且 $0\leqslant\mathbf{n}\leqslant\mathbf{N}-1$,当 $\mathbf{h}_b(\mathbf{n})$和 $\mathbf{h}_a(\mathbf{n})$满足公式(4)时,其相位将同时近似满足:

$$\angle\mathbf{H}_b(e^{j\omega})=\angle\mathbf{H}_a(e^{j\omega})-0.5\omega \tag{5}$$

此时 $\mathbf{h}_a(\mathbf{n})$的频率响应近似线性相位,通过对公式(4)进行傅里叶变换得到公式(6):

$$\mathbf{H}_b(e^{j\omega})=\overline{\mathbf{H}_a(e^{j\omega})}e^{-j(\mathbf{N}-1)\omega} \tag{6}$$

公式(6)进一步证明了 $\mathbf{h}_a(\mathbf{n})$的频率响应是近似线性相位的,且满足:

$$\angle\mathbf{H}_b(e^{j\omega})=-\angle\mathbf{H}_a(e^{j\omega})-(\mathbf{N}-1)\omega \tag{7}$$

当 DTCWT 实部和虚部滤波器关系近似满足公式(5)时,通过公式(5)和公式(7)可得到:

$$\angle\mathbf{H}_a(e^{j\omega})\approx-0.5(\mathbf{N}-1)\omega+0.25\omega \tag{8}$$

这表明实数部分的滤波器不仅近似线性相位滤波器,而且 $\mathbf{n}=0.5(\mathbf{N}-1)-0.25$ 在处近似对称,与自然对称点相差四分之一。由公式(4)可知虚数部分也满足线性相位, 因此该算法滤波器能够实现实部和虚部两树滤波器的线性关系。

采用构造长度为偶数且具有 1/4 采样延迟的低通滤波器的方法来构造合适的 $\mathbf{H}_a(e^{j\omega})$,以使第一层滤波器以后的实虚两部输出满足:

$$\mathbf{H}_a(e^{j\omega})=e^{-j0.5\omega}\mathbf{H}_a(e^{j\omega}) \tag{9}$$

参考文献[9]提出的低通滤波器对于激光主动成像图像处理的实际应用并不合适, 这是因为这种滤波器分解得到的系数均为浮点数, 且使用一阶消失矩,计算量庞大,不具备较高的计算效率。因此文中采用一种长度为上述滤波器 2 倍的低通滤波器[11],能够大大减少浮点运算,提升算法的整体效率。

上述基于 Q-shift 的 DTCWT 首先具备了一般 DTCWT 的近似平移不变性和方向选择性,在去噪过程中能够更好保护图像细节特征; 其次提升了 Q-shift 滤波器的运算速度,使去噪算法的效率更高,能够满足实际应用需要。

3 基于同态滤波和 DTCWT 的图像去噪

3.1 算法的总体思路

通过分析被高斯噪声和散斑噪声污染的成像图像的统计特性,表明了激光主动成像图像质量主要受散斑噪声影响[12],而散斑噪声为乘性噪声。因此, 可以通过同态滤波将乘性噪声转换为加性噪声, 从而可以提升 DTCWT 对噪声的抑制效果;然后再通过 DTCWT 方法分解小波系数, 用 Bayes 自适应阈值法对小波系数进行修正;最后将处理过的小波系数进行 DTCWT 重构和同态逆变换,得到去噪图像。

3.2 算法流程

基于同态滤波和 DTCWT 的图像去噪算法总体流程图如图 2 所示。

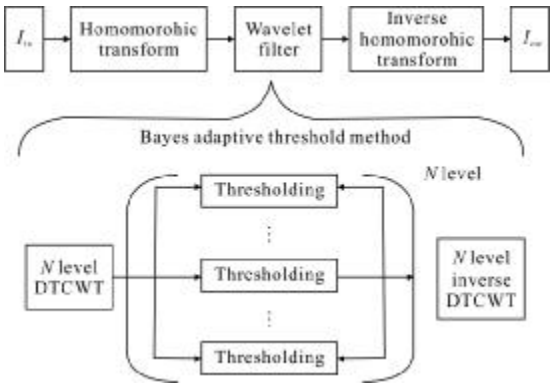


图2 去噪算法流程图

Fig.2 Flow chart of denoising algorthm

算法具体步骤可归纳如下：

(1) 对主动成像图像进行同态变换，使乘性散斑噪声变为加性噪声。

(2) 对同态滤波结果进行双树复值小波分解。

(3) Bayes 自适应阈值法去除噪声干扰。

在噪声点部分，小波系数有较大的变化，因此可以通过设定阈值把噪声点对应的小波系数滤除。如果阈值的选取过大会导致边缘信息细节的损失，如果阈值选择过小，噪声不能得到有效抑制。这里笔者应用 Bayes Shrink 阈值法求取。

Bayes Shrink 阈值估计法是在基于无噪图像小波系数服从广义高斯分布的模型假设基础上得到的。事实上，据统计，大量自然图像小波分解各子带系数基本都是对称分布在零附近的，在零点处形成一个尖峰。

$$t^*=\arg\min_{t>0} r_{Bayes}(t) \tag{10}$$

r_{Bayes} 是 Bayes 风险函数，当风险最小的时候可求得理想阈值。但是该方法是在给定阈值的情况建立起来的，对于每一层(不同尺度下)设置统一的阈值是欠妥的。Chang[13]提出了自适应阈值法，做法是各小波系数的阈值由基于该位置的图像方差自适应选择，即 Bayes 阈值($t^j_{Bayes}=\sigma_n^2/\sigma_x(j)$)改进为：

$$t^j_{Bayes}(\mathbf{m},\mathbf{n})=\frac{\sigma_n^2}{\sigma_x(j,\mathbf{m},\mathbf{n})} \tag{11}$$

式中：j 为尺度；($\mathbf{m},\mathbf{n}$)为空间位置。每个系数的参数估计采用一个移动的窗口实现(见公式(12))。

$$\hat{\sigma}_x(\mathbf{m}_0,\mathbf{n}_0)=\max\left(0,\frac{1}{2L+1}\sum_{(\mathbf{m},\mathbf{n})\in k(\mathbf{m}_0,\mathbf{n}_0)} f(\mathbf{m},\mathbf{n})^2-\sigma_n^2\right) \tag{12}$$

式中：L 为小波分解的尺度；$f(\mathbf{m},\mathbf{n})$为图像函数；σ_n 为估计方差，在($\mathbf{m}_0,\mathbf{n}_0$)点的 Bayes 阈值估计为：

$$t_{Bayes}(\mathbf{m},\mathbf{n})=\frac{\sigma_n^2}{\hat{\sigma}_x(\mathbf{m}_0,\mathbf{n}_0)}=T_0 \tag{13}$$

将大于 T_0 的小波系数作为误差舍去，并用临近的小波系数的均值代替，得到新的小波序列。

(4) 重构处理后的复值小波系数。

(5) 进行同态逆变换。

3.3 算法有效性分析

首先，激光主动成像图像中的散斑噪声为乘性噪声，通过同态滤波转换为加性噪声后，便可将 DTCWT 去噪算法应用于图像噪声抑制中。

其次，经过 DTCWT 后，对分解得到的小波系数进行阈值去噪。因为 DTCWT 具有传统小波变换的时频分析能力，而且相对于传统小波变换仅使用小波系数实数部分来说，DTCWT 对虚数部分的合理应用将会利用到更多信息；实虚两部滤波器组输出相差半个采样周期，具有近似平移不变性，并且每层分解能够得到 6 个方向的信息，比仅有水平、垂直和对角 3 个方向的离散小波变换来说，具有良好的方向选择性，所以得到的去噪图像细节信息将得到很好的保护。

再次，在 DTCWT 的滤波器设计中采用改进的 Q-shift 滤波器，使浮点运算大大减少，因此保证了算法的运算效率。

因此，该算法可以很好地滤除激光主动成像图像中的散斑噪声，且具有很好的运算效率。

4 实验结果及评价

首先验证 DTCWT 相对于离散小波在图像细节保护方面的优势。图 3(a)大小为 256×256，中央为灰度值 255 的圆形，其它地方灰度值为 0。用离散小波变换和 DTCWT 分别对图 3(a)进行 4 层分解与重构处理，得到图 3(b)~(c)所示的效果图。

(a) 原始图像 (b) 离散小波 (c) 双树复值小波

(a) Original image (b) DWT (c) DTCWT

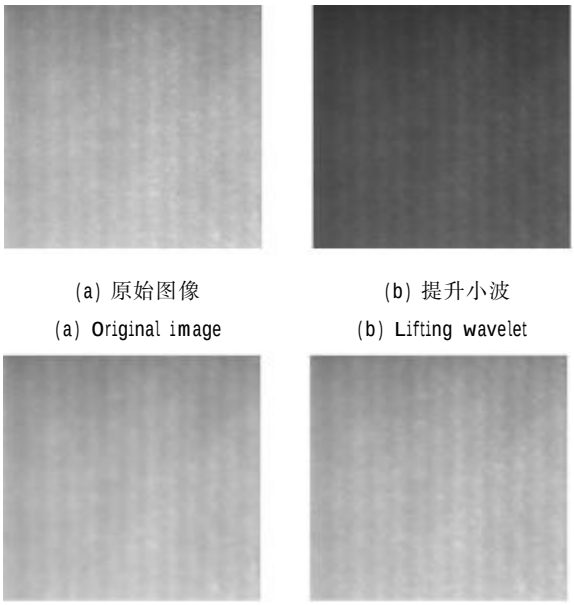
图 3 图像处理细节比较

Fig.3 Comparison of image processing detail

通过效果图可以直观看出，通过 DTCWT 处理的图像(图 3(c))比离散小波变换处理的图像(图 3(b))具有更高的分解与重构精度，保留了更好的图像细节。

而后验证提出的去噪算法性能。实验中原始图像采用实际获得的激光主动成像图像：图 4(a)实验对象为最小间隔 1 mm 的分辨率板，图 5(a)实验对象为更复杂的建筑物窗户，两幅图像成像距离约为 100 m，大小为 256×256，光源为 808 nm 自制连续激光器，最高功率100 mW，为了保证成像效果，在探测器感

光芯片窗口安放了 **OD**>5 的 808 带通滤光片。采用参考文献[12]的方法对两幅原始图像噪声进行分析,得出主要噪声为散斑噪声。实验时,分别将文中算法与提升小波[14]和 DTCWT 去噪进行比较,采用 Matlab7.7 软件实现,实验结果分别如图 4 和图 5 所示。



(a) 原始图像　(b) 提升小波

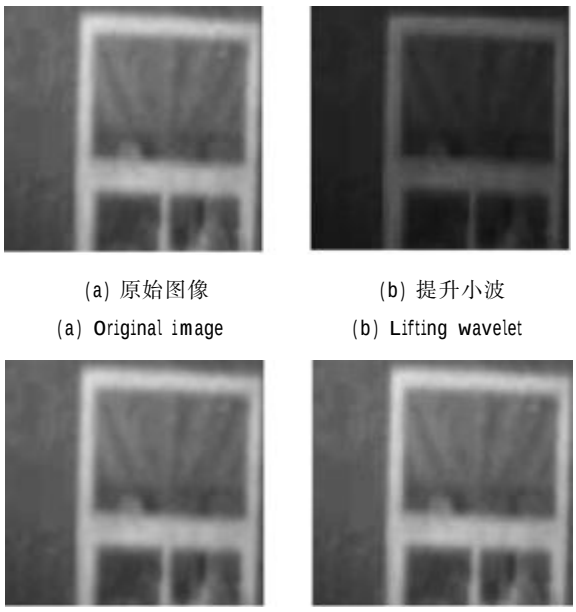
(a) Original image　(b) Lifting wavelet

(c) 双树复值小波　(d) 文中算法

(c) DTCWT　(d) Presented algorithm

图 4 去噪算法效果比较 Ⅰ

Fig.4 Comparison of denoising results Ⅰ



(a) 原始图像　(b) 提升小波

(a) Original image　(b) Lifting wavelet

(c) 双树复值小波　(d) 文中算法

(c) DTCWT　(d) Presented algorithm

图 5 去噪算法效果比较 Ⅱ

Fig.5 Comparison of denoising results Ⅱ

实验中,小波变换均分解 4 层。从处理后的直观图可以看出, 经过双树复值小波去噪和文中算法去噪的图像散斑噪声都明显减少。

此外,对算法的评价采用信噪比(SNR)、峰值信噪比(PSNR)和计算时间 3 个客观指标进行评价[15]。

表 1 图像 Ⅰ 处理评价指标比较

Tab.1 Evaluation comparison of image Ⅰ

Algorithm	SNR	PSNR	Computation time/s
Lifting wavelet	47.772 6	8.390 2	0.373 5
DTCWT	76.679 2	28.062 3	0.684 2
Presented algorithm	79.738 4	30.975 8	0.331 0

表 2 图像 Ⅱ 处理评价指标比较

Tab.2 Evaluation comparison of image Ⅱ

Algorithm	SNR	PSNR	Computation time/s
Lifting wavelet	60.223 7	12.419 5	0.532 9
DTCWT	89.245 5	40.946 2	0.924 3
Presented algorithm	92.479 7	44.675 6	0.481 7

实验数据表明,提升小波虽然计算时间较快,但是去噪能力较弱,图像质量不够好;采用 DTCWT 算法,去噪效果明显改善,但运算效率不高;文中算法不仅能够有效地去除图像噪声,且运算较快,与提升小波相比和 DTCWT 算法相比,具有更好的应用性。

5 结　论

激光主动成像技术是激光主动成像制导的关键技术之一,针对实际成像中存在的散斑现象,提出了一种基于同态滤波和 Q-shift 双数复值小波变换的图像降噪方法对成像图像进行噪声抑制, 并对算法的效果进行了评估。理论分析和实验研究证明了该算法计算效率高,且能够很好的保留图像细节,为图像特征提取提供了较好的条件。

参考文献:

[1] Wang Xiangke, Zhang Hui, Zheng Zhiqiang. Laser active imaging seeker design technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 797-801. (in Chinese)
王祥科,张辉,郑志强. 激光主动成像图像制导导引头设计[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 797-801.

[2] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intell, 1980, 2(2): 165-168.

[3] Kuan D T, Sawchuk A A. Adaptive noise smoothing filter for signal- dependent noise[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intell, 1985, 7(2): 165-177.

[4] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A mode for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intell, 1982, 4(2): 157-165.

[5] Li Xiaofeng, Xu Jun, Luo Jijun, et al. Noise analyzing and denoising of intensity image for laser active imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 20(2): 332-337. (in Chinese)
李晓峰, 徐军, 罗积军, 等. 激光主动成像图像噪声分析与抑制[J]. 红外与激光工程, 2010, 20(2): 332-337.

[6] Xu Yibin, Xu Jun, Zhao Falin, et al. Laser active image-denoising method based on wavelet transform [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12): 1786-1790. (in Chinese)
许毅玢, 徐军, 赵法林, 等. 基于小波变换的激光主动成像图像去噪方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(12): 1786-1790.

[7] Gagnon L, Smaili F D. Speckle noise reduction of airborne sar images with symmetric daubechies wavelets [C]//SPIE, 1996, 2759: 1424.

[8] Kingsbury N G. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals [J]. Journal of Applied and Computational Harmonic Analysis, 2001, 10 (3): 234-253.

[9] Kingsbury N G. Design of q-shift complex wavelets for image processing using frequency domain energy minimization [C]// Proc IEEE Int Conf Image Processing, 2003: 1013-1016.

[10] Selesnick I W. The design of approximate Hilbert transform pairs of wavelet bases[J]. IEEE Trans Signal Processing,2002, 50(5): 1144-1152.

[11] Wang Hongxia, Cheng Lizhi, Wu Yi. The design of Q-shift wavelet transform and its application in image denoising [J]. Signal Processing, 2005, 21(5): 520-524. (in Chinese)
王红霞,成礼智,吴诩. Q-shift 复小波的一种新型构造方法及其在图像去噪中的应用[J]. 信号处理, 2005, 21(5): 520-524.

[12] Li Ziqin, Li Qi, Wang Qi. Noise characteristic in active laser imaging system by statistic analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(9): 1081-1085. (in Chinese)
李自勤,李琦,王骐. 由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1081-1085.

[13] Yen J C, Chang S A, Chang S A. A new criterion for outomatic multi-level threasholding [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1995, 4(3): 370-378.

[14] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1998, 29(2): 511-546.

[15] Wang Lei, Xu Zhiyong, Zhang Qiheng, et al. Detection sensitivity analysis of underwater blue-green laser imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 79-84. (in Chinese)
王磊, 徐智勇, 张启衡, 等. 蓝绿激光水下成像系统的探测灵敏度分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 79-84.