

# 基于非局部均值滤波的激光雷达强度像去噪研究

夏志伟 李琦 丁胜晖 王 骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要** 激光成像雷达能获得角-角-距离-强度像,易于目标识别,从而备受青睐。图像处理是激光成像雷达的关键技术之一,其中图像噪声抑制对图像质量的提高起着事半功倍的作用。利用新近发展起来的非局部均值算法对相干激光雷达仿真及真实强度像进行了去噪研究。分别采用非局部均值算法、同态非局部均值算法对不同载噪比下的单目标仿真强度像进行了去噪处理,同时对比了 Lee 滤波和均值滤波处理效果。最后用真实的相干激光雷达强度像进行了验证。实验结果表明,采用同态两级非局部均值算法在满足背景噪声抑制、目标图像均匀性和边缘保持三方面要求上性能最佳。

**关键词** 图像处理;去噪;非局部均值算法;相干激光雷达;强度像

**中图分类号** TP751.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100409

## Ladar Intensity Image Denoising by Non-Local Means Algorithm

Xia Zhiwei Li Qi Ding Shenghui Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150081, China)

**Abstract** Imaging ladar can offer angle-angle-range-intensity images, which can facilitate target recognition. Imaging ladar has thus attracted much research interests. Imaging processing is a crucial technique for imaging lidar. And image denoising plays a pivotal role in image processing. A successful denoising process can greatly enhance the image quality. Image denoising for coherent ladar intensity images using non-local means (NLM) algorithm is investigated. Both simulated and real images are used. NLM algorithm and homomorphic NLM algorithm are respectively applied to denoise simulated single objective intensity images under different carrier to noise ratios. The results are compared with the denoised results of Lee filter and arithmetic mean filter. Finally, the algorithms are validated by real coherent ladar intensity images. The results show that two-level homomorphic NLM algorithm has the best performance from the aspects of background noise suppression, uniformity on the target and edge preserving.

**Key words** imaging processing; denoising; non-local averaging; coherent ladar; intensity image

**OCIS codes** 100.2000; 280.3640; 100.2980; 110.1650

## 1 引 言

激光主动成像技术具有立体视觉效果且信息量大等特点,因此受到极大的关注<sup>[1~3]</sup>。但目前远距离激光图像质量还不够清晰,通过图像数字化处理方法提高激光图像质量的研究,是激光成像技术的重要研究领域<sup>[4~6]</sup>。

相干激光雷达强度像主要受散斑噪声的影响,散斑噪声是乘性噪声,其概率密度函数服从指数分布。对含有散斑噪声强度像的复原研究,主要有基于局部统计特性和不基于局部统计特性的滤波方

法<sup>[7~9]</sup>。另外,还有利用通用方法进行同态变换的算法。非局部均值(NL-means)算法是由 Buades 等<sup>[10]</sup>于 2005 年提出的,相对于传统的统计类滤波方法,非局部均值滤波的优点是将基于点的相似性扩展为基于块的相似性,利用图像的冗余信息达到去噪目的。由于此算法有较好的去噪效果,在很多图像处理研究领域得到改进、推广和应用<sup>[11~13]</sup>。在对散斑噪声抑制上,杨学志等<sup>[14]</sup>提出了一种用于合成孔径雷达(SAR)图像的基于非局部均值滤波方法,通过同态变换采用两级非局部均值滤波,来削弱相干斑噪声对结构相似性度量的影响,提高去噪性能。

收稿日期:2011-01-10;收到修改稿日期:2011-02-22

作者简介:夏志伟(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光图像处理方面的研究。E-mail:xiashw@126.com

导师简介:李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像方面的研究。

E-mail:hit\_liqi@yahoo.com.cn(通信联系人)

目前,尚无基于非局部均值滤波方法用于相干激光成像雷达去噪处理的研究报道。本文在文献[10]所提算法及文献[14]所提改进算法的基础上,利用非局部均值滤波对相干激光雷达仿真和真实强度像进行了去噪研究。分别采用非局部均值算法、同态非局部均值(HNL-means)算法对不同载噪比下的单目标仿真强度像进行了去噪处理,同时对比了Lee滤波和均值滤波处理效果;最后用真实的相干激光雷达强度像进行了验证。

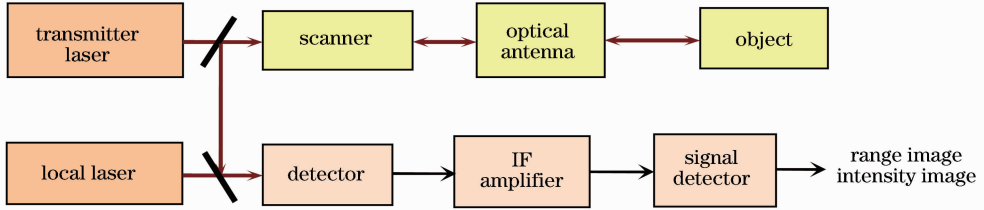


图 1 相干激光雷达原理框图

Fig. 1 Block diagram of a coherent lidar

## 2.2 非局部均值滤波算法

非局部均值滤波算法的基本思想是:当前像素点的灰度值是由图像中所有与其结构相似的像素点的灰度值加权平均得到的,结构越相似权重越大。

给定一幅离散的含噪图像  $g = \{g(i) \mid i \in I\}$ ,  $I$  表示整幅图像。对其中任何一个像素  $i$ , 利用图像中所有像素值的加权平均来得到该点的估计值  $N_L[g](i)$ , 即<sup>[10]</sup>

$$N_L[g](i) = \sum_{j \in I} w(i, j) g(j), \quad (1)$$

式中权值  $w(i, j)$  依赖于像素  $i$  与像素  $j$  之间的相似性, 并满足  $0 \leq w(i, j) \leq 1$  且  $\sum_j w(i, j) = 1$ 。为加快运算速度, 采用搜索窗口  $I_s$  代替整幅图像

$$N_L[g](i) = \sum_{j \in I_s} w(i, j) g(j). \quad (2)$$

两个像素  $i$  与  $j$  之间的相似性由灰度值向量  $\mathbf{g}(N_i)$  与  $\mathbf{g}(N_j)$  之间的相似性决定, 其中  $N_l$  表示以像素  $l$  为中心的固定大小  $(2m+1) \times (2m+1)$  的正方形邻域。各邻域灰度值向量之间的相似性通过加权的欧氏距离来衡量。设  $n_i, n_j$  为  $N_i, N_j$  中处于相同位置的像素灰度值, 权重定义为

$$w(i, j) = \frac{1}{G(i)} \exp \left[ \frac{\sum_{n_i \in N_i, n_j \in N_j, k_i \in k} k_i (n_i - n_j)^2}{h^2} \right], \quad (3)$$

式中  $k$  为相似性核(或称相似性窗口), 由  $(2m+1) \times (2m+1)$  元素构成, 元素  $k_i$  可表示为

## 2 去噪算法原理

### 2.1 CO<sub>2</sub> 相干激光雷达系统的构成

CO<sub>2</sub> 相干激光雷达工作原理如图 1 所示。主振激光器发射激光脉冲, 这些脉冲经过扫描装置和收发合置光学系统后, 照射到目标上, 经目标反射后再次经过光学系统与本振光在探测器光敏面上进行混频, 得到外差信号, 通过中频(IF)放大、信号检测, 得到三维图像信息。

$$k_i = \frac{1}{m} \sum_{d=d_i}^m \frac{1}{(2d+1)^2}, \quad (4)$$

式中  $d_l$  为像素  $l$  距中心像素  $i$  的欧氏距离的整数值, 中心像素的欧氏距离  $d_i = 1$ 。归一化常数  $G(i)$  为

$$G(i) = \sum_j \exp \left[ \frac{\sum_{n_i \in N_i, n_j \in N_j, k_i \in k} k_i (n_i - n_j)^2}{h^2} \right], \quad (5)$$

参数  $h$  控制指数函数的衰减速度, 因而决定着滤波的平滑程度, 可由图像的标准差估计。

### 2.3 同态非局部均值滤波算法

受到散斑噪声  $v(x, y)$  污染的相干激光雷达强度图像  $f(x, y)$  可表示为

$$g(x, y) = f(x, y) v(x, y), \quad (6)$$

散斑强度  $v(x, y)$  在  $(x, y)$  点处的概率密度函数可表示为

$$P[v(x, y)] = \frac{1}{\langle v(x, y) \rangle} \exp \left[ -\frac{v(x, y)}{\langle v(x, y) \rangle} \right]. \quad (7)$$

乘性噪声较加性噪声难于抑制, 原则上采用同态变换可以将其转变为加性噪声处理。

同态非局部均值滤波算法框图如图 2 所示。首先将相干激光雷达强度像进行自然对数变换; 然后, 根据噪声标准差估计进行非局域均值滤波, 最后再进行 e 指数变换获得去噪后的强度像。

在非局域均值滤波部分, 本文除采用了单次非局域均值滤波外, 也采用了两级非局域均值滤波方法, 即使用两次非局域均值滤波以便更好地抑制散斑噪声。

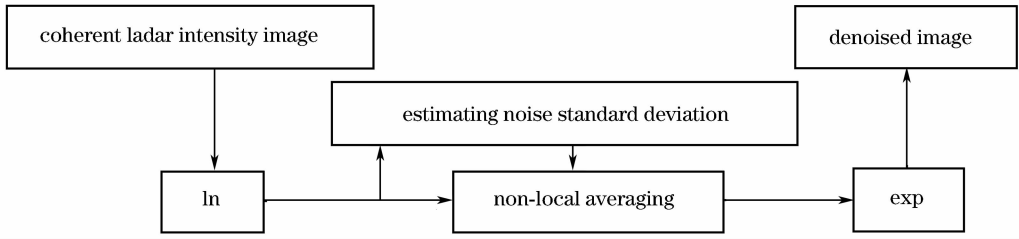


图2 同态非局部均值算法框图

Fig. 2 Scheme for HNL-means algorithm

## 2.4 均值滤波和 Lee 滤波

散斑噪声抑制算法中,基于局部统计特性的滤波方法,主要有 Lee 滤波、Kuan 滤波和 Frost 滤波。这类方法滑动窗口抑制散斑技术是最早研究并应用的专用技术。不基于局部统计特性的滤波方法主要有传统的均值滤波和中值滤波等。这类方法没有考虑散斑的统计特性,不具有针对性。

均值滤波的思想是图像中某一个像素的灰度值  $f(x, y)$ , 由其邻域  $S$  (即  $n \times n$  方形窗口) 内所有像素的灰度值的均值  $\bar{f}(x, y)$  替代, 其数学表达式为

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{n \times n} \sum_{i, j \in S} f(x+i, y+j). \quad (8)$$

均值滤波在降低噪声的同时使图像变得模糊, 边缘和细节的损失也较大。邻域选得越大, 模糊就越厉害。

Lee 滤波是较常用于散斑噪声抑制的算法, 是基于局部最小均方误差估计滤波的, 其数学表达式为<sup>[7]</sup>

$$\hat{f} = \bar{f} + k(g - \bar{f}) = \bar{f} + \frac{\text{var}(f)}{\text{var}(f) + f^2 \sigma_v^2} (g - \bar{f}), \quad (9)$$

$$\bar{g} = \bar{f}, \quad (10)$$

$$\text{var}(f) = \frac{\text{var}(g) + \bar{g}^2}{\sigma_v^2 + 1} - \bar{f}^2, \quad (11)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\text{var}(g) / \bar{g}}, \quad (12)$$

式中符号“ $\bar{\quad}$ ”表示平均值,  $\text{var}(\quad)$  表示求方差; 这两项由滤波窗口内的像素求得。

在实际应用此算法时, 由于滤波窗口大小有限, 或使用了比真实值较大的  $\sigma_v^2$ , (11) 式中的  $\text{var}(f)$  可能取得负值。此时, 令  $\text{var}(f)$  的值为零, 以保证 (9) 式中等号右端第 2 项的系数处于  $0 \sim 1$  之间。噪声方差  $\sigma_v^2$  为一常数, 可由 (12) 式计算, 一般取图像均匀区域进行估算或按经验取值。

## 3 算法比较

本文所采用的仿真和真实相干激光雷达强度像

大小均为  $32 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ , 灰度值范围  $0 \sim 255$ , 仿真目标为坦克, 其模型如图 3 所示。非局部均值滤波算法一律采用  $(2n+1) \times (2n+1)$  搜索窗口和  $(2m+1) \times (2m+1)$  相似性窗口, 其中  $n=7, m=2$ 。设参数  $h=cs$ , 其中  $s$  为整幅图像的标准差,  $c$  为控制系数。由于激光雷达强度像像素较少, Lee 滤波采用  $3 \times 3$  窗口; 根据真实相干激光雷达数据, 选取  $\sigma_v = 0.66$ 。

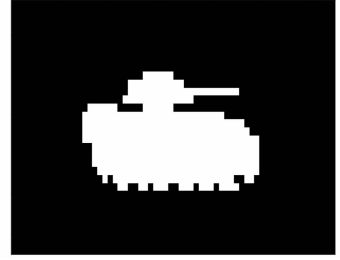


图3 仿真目标模型

Fig. 3 Simulation object pattern

首先对仿真相干激光雷达强度像进行了去噪处理。仿真激光雷达图像中重要的参数是载噪比 (CNR), 其定义为

$$R_{\text{CN}} = P_{\text{rr}} / P_{\text{shn}}, \quad (13)$$

式中  $P_{\text{rr}}$  表示信号的平均返回功率;  $P_{\text{shn}}$  表示本振散粒噪声平均功率。

仿真中, 背景载噪比一律为  $1 \text{ dB}$ 。图 4 给出目标载噪比为  $12 \text{ dB}$  时的相干激光雷达仿真强度像及非局域均值算法、同态非局域均值算法、均值滤波和 Lee 滤波处理结果。图 4(b) 给出  $c=1$  时的图 4(a) 非局域均值算法结果, 显然背景噪声得到明显抑制, 目标轮廓较清晰。图 4(c) 给出  $c=1$  时的图 4(a) 同态非局域均值算法结果, 显然目标与背景均匀性都有所提高, 但背景不如图 4(b) 均匀, 且边缘, 尤其炮筒有些模糊。为此, 减小  $c$  的取值, 图 4(d) 给出  $c=0.5$  时的图 4(a) 同态非局域均值算法结果, 显然目标比图 4(c) 保持边缘能力有所提高, 但背景均匀性还不够好。为此, 在同态变换后, 采取两次非局域均值算法。图 4(e) 的同态两级非局域均值算法, 目标、背景均匀性都较好, 同时边缘保持较好, 只炮筒

部分有信息丢失,这主要是由于炮筒像素过少。图 4(f)和(g)分别给出  $5 \times 5$  和  $3 \times 3$  同态非局域均值算法结果,显然模糊程度很大。图 4(h)的 Lee 滤

波在边缘保持上最好,但在背景噪声抑制和目标上图像均匀性上不及同态两级非局域均值算法和非局域均值算法。

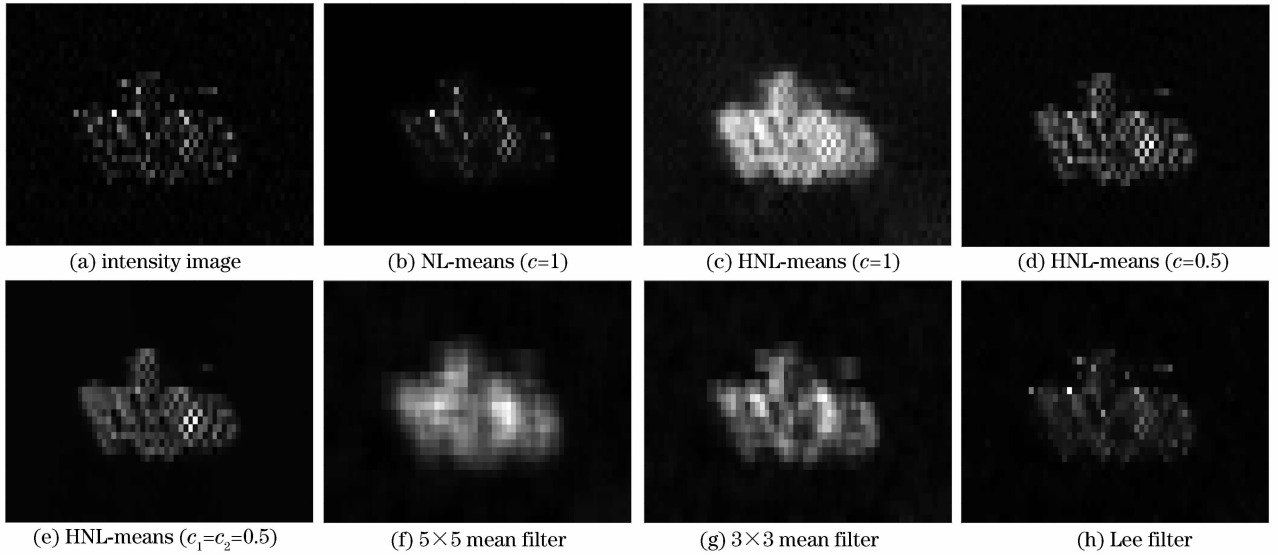


图 4 12 dB 仿真强度像及去噪结果

Fig. 4 12 dB simulated intensity image and denoised results

表 1 给出目标载噪比为 12 dB 时,仿真强度像及以上算法处理后的标准差。从表 1 中可以看出,非局域均值算法处理后的图像整体标准差最小,同态两级非局域均值算法次之, Lee 滤波最大。这说明在一定程度上, Lee 滤波的平滑效果最差。在背景噪声抑制和目标上图像均匀性及边缘保持综合考虑情况下,以上算法中,同态两级非局域均值算法最佳。

图 5 给出目标载噪比为 10 dB 时的相干激光雷达仿真强度像及非局域均值算法、同态非局域均值

算法、均值滤波和 Lee 滤波处理结果。

显然,由于图 5(a)的仿真图像噪声较图 4(a)严重,因此图像更不清晰,处理后的结果也不如图 4 处理结果好,但可以得出跟图 4 相似的算法对比结果。即,同态两级非局域均值算法,目标、背景均匀性都较好, Lee 滤波在边缘保持上最好,但在背景噪声抑制和目标上图像均匀性上不及同态两级非局域均值算法和非局域均值算法。

表 2 给出目标载噪比为 10 dB 时,仿真强度像

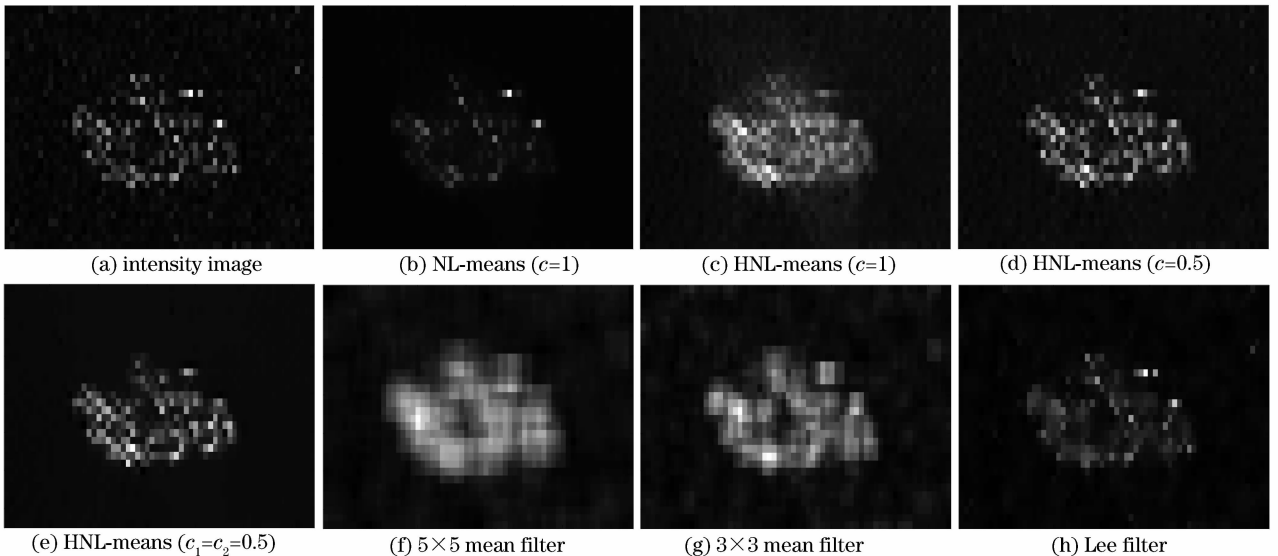


图 5 10 dB 仿真强度像及去噪结果

Fig. 5 10 dB simulated intensity image and denoised results

及以上算法处理后的标准差。

图 6 给出真实的 CO<sub>2</sub> 相干激光雷达仿真强度像及非局域均值算法、同态非局域均值算法、均值滤波和 Lee 滤波处理结果。显然真实激光雷达图像噪声较小,因此,图像最为清晰。由于噪声不严重,在同态两级非局域均值算法中,第 2 次非局域均值滤

波参数  $c_2$  选择 0.2。同态两级非局域均值算法目标、背景均匀性都较好, Lee 滤波在边缘保持上最好,但在背景噪声抑制和目标图像均匀性上不及同态两级非局域均值算法和非局域均值算法。

表 3 给出真实相干激光成像雷达强度像时及以上算法处理后的标准差。

表 1 12 dB 强度像及去噪图像的标准差

Table 1 Standard deviation of 12 dB intensity image and denoised images

Simulated image	NL-means ( $c=1$ )	HNL-means ( $c=1$ )	HNL-means ( $c=0.5$ )	HNL-means ( $c_1=c_2=0.5$ )	Mean filter ( $5 \times 5$ )	Mean filter ( $3 \times 3$ )	Lee filter	
Standard deviation	22.27	12.08	6.14	12.27	10.34	12.68	14.13	16.52

表 2 10 dB 强度像及去噪图像的标准差

Table 2 Standard deviation of 10 dB intensity image and denoised images

Simulated image	NL-means ( $c=1$ )	HNL-means ( $c=1$ )	HNL-means ( $c=0.5$ )	HNL-means ( $c_1=c_2=0.5$ )	Mean filter ( $5 \times 5$ )	Mean filter ( $3 \times 3$ )	Lee filter	
Standard deviation	25.11	12.29	5.46	12.46	10.16	11.98	13.84	17.13

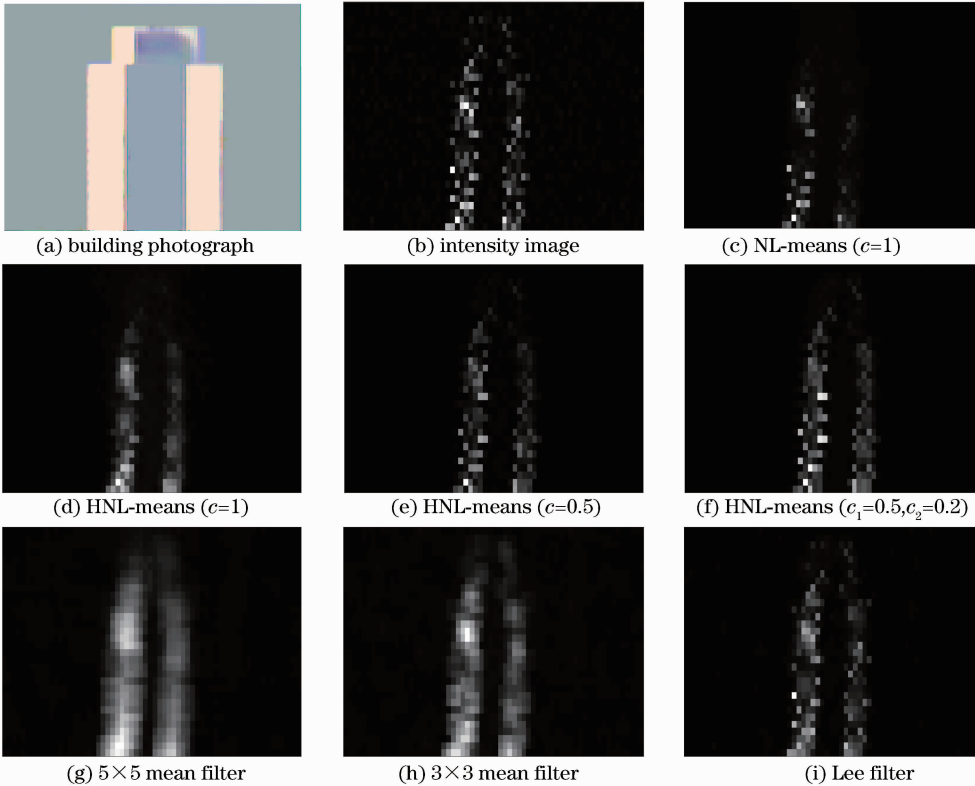


图 6 真实强度像及去噪结果

Fig. 6 Actual intensity image and denoised results

表 3 真实强度像及去噪图像的标准差

Table 3 Standard deviation of actual intensity image and denoised images

Simulated image	NL-means ( $c=1$ )	HNL-means ( $c=1$ )	HNL-means ( $c=0.5$ )	HNL-means ( $c_1=c_2=0.5$ )	Mean filter ( $5 \times 5$ )	Mean filter ( $3 \times 3$ )	Lee filter	
Standard deviation	23.63	13.45	4.91	13.93	12.01	12.47	14.75	18.60

## 4 结 论

利用非局部均值滤波对相干激光雷达仿真和真实强度像进行了去噪研究,比较了非局域均值算法、同态非局域均值算法、均值滤波和 Lee 滤波处理结果。比较结果表明,同态两级非局域均值算法目标、背景均匀性都较好, Lee 滤波在边缘保持上最好,但在背景噪声抑制和目标上图像均匀性上不及同态两级非局域均值算法和非局域均值算法。在背景噪声抑制和目标上图像均匀性及边缘保持综合考虑情况下,以上算法中,同态两级非局域均值算法最佳。

## 参 考 文 献

- 1 Alfred B. Gschwendtner, William E. Keicher. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory [J]. *Lincoln Laboratory J.*, 2000, **12**(2):383~396
- 2 Wei Jingsong, Wang Qi, Sun Jianfeng *et al.*. Experiment of four-dimensional imaging with single-slit streak tube lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5):1231~1235  
魏靖松,王 骐,孙剑峰等. 单狭缝条纹管激光雷达四维成像实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5):1231~1235
- 3 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2):566~568  
周 煜,许 楠,栾 竹等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2):566~568
- 4 Yao Jinliang, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Image registration and superposition for improving ranging accuracy of imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6):1613~1617  
姚金良,严惠民,张秀达等. 一种应用图像配准叠加提高成像激光雷达测距精度的方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6):1613~1617
- 5 Li Qi, Wang Yongzhen, Wang Qi *et al.*. Noise suppression algorithm of coherent laser range image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):581~584  
李 琦,王永珍,王 骐等. 相干激光雷达距离像的噪声抑制算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):581~584
- 6 Qi Wang, Qi Li, Zhe Chen *et al.*. Range image noise suppression in laser imaging system [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(2):140~147
- 7 J. S. Lee. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. *IEEE Trans. Pat. Anal. Mach. Intell.*, 1980, **PAMI-2**(2):380~389
- 8 J. S. Lee. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, **17**(1):24~32
- 9 Firooz A. Sadjadi. Perspective on techniques for enhancing speckled imagery [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(1):25~30
- 10 A. Buades, B. Coll, J Morel. A non-local algorithm for image denoising [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, **2**(2):60~65
- 11 Qin Hanlin, Liu Shangqian, Zhou Huixin *et al.*. Background suppression for dim small target with Gabor kernel non-local means [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4):737~741  
秦翰林,刘上乾,周慧鑫等. 采用 Gabor 核非局部均值的弱小目标背景抑制[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4):737~741
- 12 Liu Yanli, Guo Yanwen, Wang Jin *et al.*. Non-local means image denoising in wavelet domain with unknown noise variance [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2009, **21**(4):526~532  
刘艳丽,郭延文,王 进等. 噪声方差未知的小波域中非局部均值图像去噪[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, **21**(4):526~532
- 13 Sun Weifeng, Peng Yuhua. An improved non-local means denoising approach [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(4):923~928  
孙伟峰,彭玉华. 一种改进的非局部平均去噪方法[J]. *电子学报*, 2010, **38**(4):923~928
- 14 Yang Xuezhi, Shen Jing, Fan Lianghuan. Structure-preserving speckle reduction of using nonlocal means filter [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, **14**(1):2443~2450  
杨学志,沈 晶,范良欢. 基于非局部均值滤波的结构保持相干斑噪声抑制方法[J]. *中国图象图形学报*, 2009, **14**(1):2443~2450