

基于块匹配和三维滤波的相干激光雷达图像 去噪研究

夏志伟 李琦 刘正君 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 针对相干激光雷达距离像和强度像的不同噪声特性,分别采用基于块匹配和三维滤波(BM3D)算法对距离像和强度像进行了去噪处理,并与非局部均值(NLM)算法的去噪结果进行了比较和分析。实验仿真结果表明,对于强度像,同态 BM3D 算法明显好于同态 NLM 算法,在保持目标区域的灰度分布均匀性、保持及恢复图像边缘等方面具有较好的性能;对于距离像,由于一般更注重保持正确的距离值,BM3D 和 NLM 算法均不够理想。

关键词 图像处理;图像去噪;块匹配和三维滤波;非局部均值算法;相干激光雷达

中图分类号 TN958.98; TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s114010

Study on Coherent Ladar Image Denoising by Block-Matching and 3D Filtering

Xia Zhiwei Li Qi Liu Zhengjun Wang Qi

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

Abstract Due to the different characteristics between the range and intensity images of ladar, block-matching and 3D filtering (BM3D) is used in both range image and intensity image denoising respectively. And the denoising results are compared and analyzed with those of non-local means (NLM) filtering. The results of experiments show as follows. For intensity image, homostasis BM3D algorithm, which has a better performance in restoring the edge of objects and keeping smoothness in homogeneous area, is better than homostasis NLM algorithm. Generally speaking, preserving right range value is significant for range image processing, so both BM3D and NLM are not sufficient ideal under the circumstance.

Key words image processing; image denoising; block-matching and 3D filtering; non-local means filtering; coherent ladar

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 110.1650; 280.3640

1 引言

激光主动成像技术能获得距离像和强度像,较一般成像方式获得的灰度像,具有立体视觉效果,且信息量增大,因此受到极大的关注^[1,2]。随着激光技术和探测器件的进步,激光主动成像研究日趋向小型、快速成像方向发展。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^[3~6]。

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。对含有散斑噪声的强度像的复原研究,主要有基于局部统计特性和基于非局部统计特性的滤波方法。另外,还有利用通用方法进行同态变换的算法。相干激光雷达距离像主要有均匀分布噪声和高斯噪声,一般采用中值滤波、顺序统计滤波、形态滤

收稿日期: 2012-02-20; 收到修改稿日期: 2012-04-23

作者简介: 夏志伟(1982—),男,硕士研究生,主要从事激光图像处理方面的研究。E-mail: xiazhw@126.com

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

(通信联系人)

波等方法加以抑制。

文献[7]提出了一种空域非局部均值滤波算法(NLM),其基本思想是图像中每一个像素点的估计值是所有邻域结构相似的点的加权平均。该算法是非局部的,原则上可以利用图像中的所有点。文献[8]提出一种基于块匹配和三维滤波(BM3D)的图像去噪算法,通过将含有相似块的图像二维数据依次进行块匹配并堆叠成三维阵列,并进行3D变换、收缩频谱和3D逆变换3步操作,得到滤波后的二维图像块组成的三维数据。由于图像块间的相似性,3D变换可以获得一个高度稀疏的真实信号的表示,因此可以通过收缩来很好地分离噪声。该算法不仅复原了相似块间共有的细节部分,同时也保持了各相似块自身的基本特性。

BM3D的块匹配过程与非局部均值的邻域搜索过程十分相似,都是通过参考块与其他图像块之间的某种度量来比较块之间的相似性,为下一步的滤波做准备。不同之处在于,非局部均值算法仅用块之间的相似性程度决定权重,且仅有块的中心像素点对滤波有贡献,为逐点滤波;BM3D对收集到的所有相似块都进行了滤波处理,每一相似块均对滤波

结果有贡献,为逐块滤波。此方法被公认为目前最有效的滤波方法之一,在很多图像处理研究领域得到改进、推广和应用^[9~11]。

目前,国内已有基于NLM方法的相干激光雷达图像去噪研究^[12,13],但尚无基于BM3D方法用于相干激光成像雷达去噪处理的研究报道。本文分别采用BM3D和同态BM3D对距离像和强度像进行了去噪处理,并对比分析了BM3D和NLM对相干激光雷达图像的去噪效果。

2 相干激光雷达和图像去噪算法基本原理

2.1 相干激光雷达原理简介^[12]

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,通过中频放大、信号检测,得到三维图像信息。

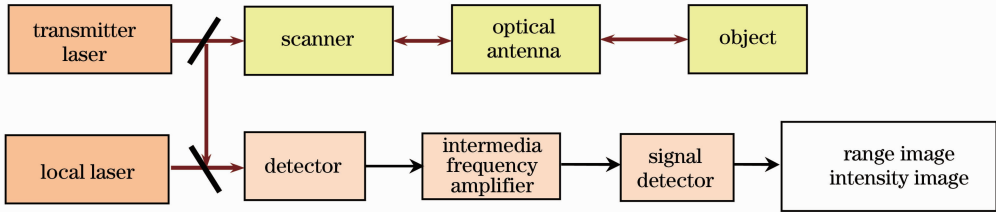


图1 相干激光雷达原理框图

Fig. 1 Block diagram of a coherent lidar

2.2 非局部均值算法^[7,12,13]

给定一幅离散的含噪图像 $g = \{g(i) | i \in I\}$, I 表示整幅图像。为加快运算速度,采用搜索窗口 I_s 代替整幅图像。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 $\hat{g}(i)$,即:

$$\hat{g}(i) = \sum_{j \in I_s} w(i, j) g(j), \quad (1)$$

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 $\sum_j w(i, j) = 1$ 。

两个像素 i 与 j 之间的相似性由邻域灰度值 $g(N_i)$ 与 $g(N_j)$ 之间加权的欧氏距离来衡量,其中 N_i, N_j 表示以像素 i, j 为中心的固定大小 $(2m+1) \times (2m+1)$ 的正方形邻域。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

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

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

$$k_i = \frac{1}{m} \sum_{d=d_l}^m \frac{1}{(2d+1)^2}, \quad (3)$$

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

$$G(i) = \sum_j \exp \left[\frac{\sum_{n_i \in N_i, n_j \in N_j, k_i \in k} k_i (n_i - n_j)^2}{h^2} \right], \quad (4)$$

式中参数 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 BM3D 及同态 BM3D 算法^[8]

考虑图像噪声为加性高斯噪声, BM3D 算法分

为基本估计和最终估计两个步骤,其流程图如图 2 所示,包围在点划线线内的操作对每一参考块(用字母 R 标记)均重复执行一次,简要表述如下。

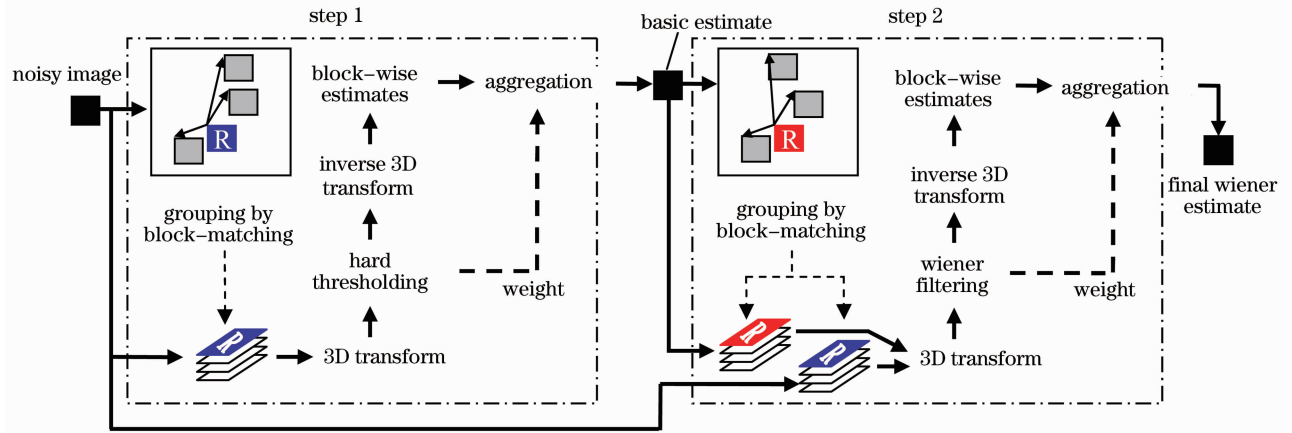


图 2 BM3D 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the BM3D algorithm

2.3.1 基本估计

基本估计即是对噪声图像执行块匹配并进行硬阈值滤波。

1) 块估计(Block-wise estimates)。从噪声图像依次取一大大小为 $N_1 \times N_1$ 的参考块,执行以下操作:

a) 块匹配(Grouping)。使用 l^2 距离作为图像块间的相似性度量,在以参考块为中心、大小为 $N_s \times N_s$ 的图像区域,找到参考块的相似块并依次堆叠成一 3D 阵列(图像群)。为减少计算的复杂性,限定相似块总数的上限为 $N_2 \in \mathbf{N}$ 。

b) 联合硬阈值(Collaborative hard-thresholding)。对图像群进行 3D 变换,对变换系数应用阈值为 $\lambda_{3D}\sigma$ 的硬阈值来减少噪声,然后进行 3D 逆变换,将估计值返回到相似块的原位置。这里的 3D 变换采用 2D-Bior1.5 变换加 1D Haar 变换的方法(等价于一个可分离的 3D 变换),即 3D 阵列中的相似块内部采用 2D-Bior1.5 变换,在各相似块间,在首块到末块方向上对所有像素点执行 1D Haar 变换。

2) 聚集(Aggregation)。根据残留较多噪声的块估计应分配较小权重的原则,按指定方法计算权重系数,对图像中有重合部分的块估计执行加权平均,得到真实图像的基本估计 \hat{y}^{basic} 。这里引入参数为 β 的 Kaiser 窗函数作为权重值的一部分,以减少 2D 变换所造成的边界效应。

2.3.2 最终估计

最终估计即是根据真实图像的基本估计,执行块匹配并对噪声图像进行维纳滤波。

1) 块估计。对噪声图像的每一块,执行以下操作:

a) 块匹配。根据图像的基本估计 \hat{y}^{basic} ,采用和第一步相同的方法执行块匹配,找到当前图像块的相似块,并依次堆叠成两 3D 阵列(图像群),两图像群分别来自噪声图像和基本估计图像,且相似块在图像中的位置相同并一一对应;

b) 联合维纳滤波。对两图像群进行 3D 变换后,采用基本估计图像群的功率谱作为真实图像的功率谱,对含噪声的图像群进行维纳滤波,滤波后执行 3D 逆变换,将估计值返回到相似块的原位置。这里的 3D 变换采用 2D-DCT 变换加 1D Haar 变换,方法与第一步相同。

2) 聚集。和第一步类似,引入 Kaiser 窗函数,按指定方法计算权重系数,对图像的块估计执行加权平均,得到真实图像的最终估计 \hat{y}^{final} 。

2.3.3 同态 BM3D 滤波算法

首先将相干激光雷达强度像进行自然对数变换;然后进行 BM3D 滤波,最后再进行 e 指数变换,获得去噪后的强度像。

3 仿真结果及分析

3.1 相干激光雷达强度像

相干激光雷达强度像中所含噪声为散斑噪声,由于散斑噪声为乘性噪声,因此本文采用同态变换,使乘性噪声图像的去噪转化为加性噪声处理。首先对相干激光雷达强度像进行对数变换并规格化灰度

值为[0,255]区间,然后估计图像方差 σ ,分别执行BM3D滤波和NLM滤波,滤波后对所得图像再分别进行指数变换并规格化以恢复图像的原始特性。

相干激光雷达图像中重要的参数是载噪比(CNR),其定义如下:

$$R_{CN} = \frac{P_{rr}}{P_{shn}}, \quad (5)$$

式中 P_{rr} 为信号的平均返回功率, P_{shn} 为本振散粒噪声平均功率。

图3为仿真中所采用的相干激光雷达距离像参考图像,分别为分辨率板和汽车,图像大小均为128 pixel×128 pixel,黑色区域为背景。分辨率板图像由7个横矩形组和竖矩形组,每组由3个 $n \times 5n$ 像素($n=1,2,3,\dots,7$)的矩形组成,两矩形间的间隔为 n 像素,一个30 pixel×30 pixel的正方形和一个直径30 pixel的圆形组成。前者目标细节较

多,即前者高频信息多,后者低频信息多。强度像背景载噪比取1 dB,分辨率板目标载噪比取12 dB,汽车目标车主体部分载噪比取12 dB,车窗和轮胎的载噪比分别比车主体低2 dB和3 dB。分辨率板和汽车的仿真强度像如图4(a),(d)所示,图像方差分别为46.1和38.9。

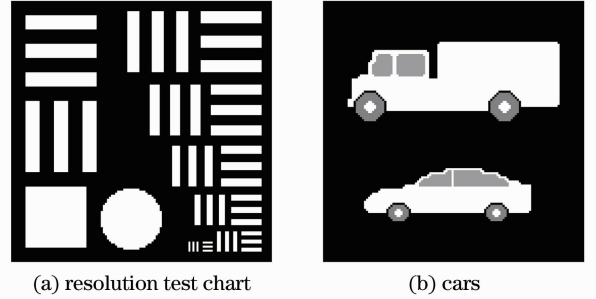


图3 强度像参考图像(128 pixel×128 pixel)
Fig. 3 Reference of intensity images
(128 pixel×128 pixel)

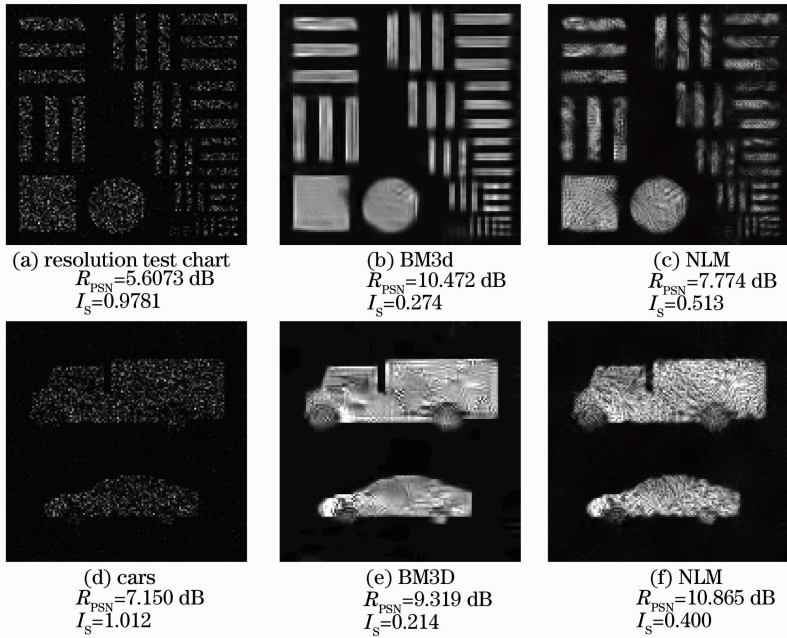


图4 分辨率板和汽车强度像及BM3D和NLM的去噪结果

Fig. 4 Intensity images of resolution test chart and cars and denoised results by BM3D and NLM

为了客观评价图像的去噪效果,采用峰值信噪比和散斑指数作为图像客观评价指标。设 x_i, y_i 分别表示参考图像和待评价图像的第 i 个像素,峰值信噪比(PSNR)和散斑指数(SI)的定义分别为

$$R_{PSN} = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - x_i)^2}, \quad (6)$$

$$I_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\sigma_i}{\mu_i}, \quad (7)$$

式中 σ_i, μ_i 分别表示图像的第 i 个窗口像素的标准

差和均值, M 为窗口内所含像素的总数。散斑指数的计算限定为强度像的目标区域。

分别采用BM3D和NLM算法对分辨率板和汽车强度像去噪。BM3D参数如表1所示,各参数含义同文献[8]。NLM参数为:搜索窗口15 pixel×15 pixel,相似窗口5 pixel×5 pixel,对于分辨率板和汽车图像, h 分别取0.8 σ 和1.0 σ 。

图4给出分辨率板和汽车强度像的同态BM3D算法和同态NLM算法的去噪结果。由于去噪处理

后的强度图像亮度太低,为提高视觉效果,去噪图像均经灰度值拉伸处理。显然,将图 4(b)与图 4(c)对比可以看出,BM3D 较 NLM 更能分辨出目标细节,即高频部分,且目标边缘保持较好,目标区域的灰度分布均匀。而 NLM 的去噪图像中目标边缘模糊不清,目标区域灰度起伏较大,仍残留有少量散斑噪声。从图像的客观评价指标来看,BM3D 的峰值信噪比 $R_{\text{PSN}}=10.472$ dB,远高于 NLM 的 7.774 dB; BM3D 目标区域的散斑指数 $I_s=0.274$,明显低于 NLM 的 0.513。因此 BM3D 对于图 4(a)的去噪处理比 NLM 更好。

表 1 BM3D 所用参数

Table 1 Parameters of BM3D

	Parameters	$\sigma \leq 40$	$\sigma > 40$
Step 1 (Hard threshold)	Γ_{2D}^{ht}	2D-Bior1.5	2D-Bior1.5
	N_1^{ht}	8	8
	N_2^{ht}	16	32
	$N_{\text{step}}^{\text{ht}}$	1	1
	N_s^{ht}	39	39
	β^{ht}	2	2
	λ_{2D}^{ht}	0	0
	λ_{3D}^{ht}	2.7	2.8
	$\tau_{\text{match}}^{\text{ht}}$	2500	25000
	Γ_{1D}^{ht}	1D-Haar	1D-Haar
Step 2 (Wiener filter)	Γ_{2D}^{wie}	2D-DCT	2D-DCT
	N_1^{wie}	8	11
	N_2^{wie}	32	32
	$N_{\text{step}}^{\text{wie}}$	1	1
	N_s^{wie}	39	39
	β^{wie}	2	2
	$\tau_{\text{match}}^{\text{wie}}$	400	3500
	Γ_{1D}^{wie}	1D-Haar	1D-Haar

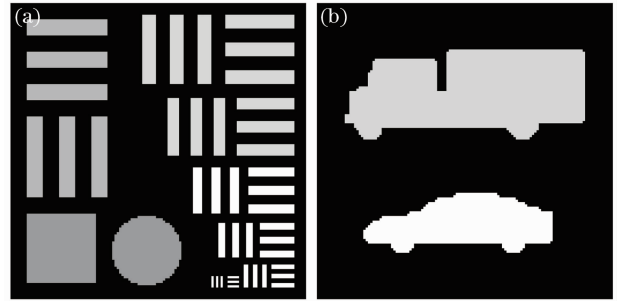
与分辨率板图像相比,汽车图像细节较少,即高频成分少一些。但强度像中汽车目标各部分的载噪比不同,为散斑噪声的去除增加了一定难度。BM3D 和 NLM 的去噪图像之间的差距依然很明显,从目标的均匀度和边缘保持能力来看,BM3D 比 NLM 都更好一些,BM3D 的去噪图像中目标区域的灰度分布更均匀,目标边缘保持更好、更清晰一些。从图像的客观评价指标来看,NLM 算法的峰值信噪比 $R_{\text{PSN}}=10.865$ dB,较 BM3D 的 9.319 dB 要高一些,但 BM3D 的散斑指数 $I_s=0.214$,远低于 NLM 的 0.400,散斑噪声的抑制效果较好。经分析可知,BM3D 算法的 R_{PSN} 值较低的原因在于 BM3D 算法去噪图像的亮度较 NLM 要低一些。因此,综合考虑去噪图像的整体效果,BM3D 对于图 4(d)的

去噪处理比 NLM 较好一些。

从去噪图像中可以看出,BM3D 的滤波结果在恢复目标区域的灰度分布均匀性、保持及恢复图像边缘等方面具有较好的性能,复原图像在视觉效果上好于 NLM 的复原图像。NLM 算法的去噪效果与 BM3D 相比要差一些。当强度像目标细节较多时,这一优势可以得到更为明显的体现。

3.2 相干激光雷达距离像

相干激光雷达距离像中含有均匀分布噪声和高斯噪声。图 5 为仿真中所采用的相干激光雷达距离像参考图像,分别为分辨率板和汽车,图像大小均为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,黑色区域为背景。相干激光雷达距离像中灰度值代表实际测量中的距离值,不同的灰度值代表不同的距离值,因此假设分辨率板图像含有 4 个目标,汽车图像含有两个目标,目标间灰度差值为 32 个灰度级,设定图 5(a)目标上的灰度值分别为 255、223、191 和 159,图 5(b)目标上的灰度值分别为 255 和 223。分辨率板和汽车图像的仿真距离像如图 6(a),(d)所示,载噪比均为 12dB,图像方差分别为 66.1 和 67.1。

图 5 距离像参考图像($128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$)Fig. 5 Reference of range images ($128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$)

分别采用 BM3D 和 NLM 算法对分辨率板和汽车距离像去噪。BM3D 参数如表 1 所示,NLM 参数为搜索窗口 15×15 ,相似窗口 5×5 , $h=0.8\sigma$ 。

图 6 给出了分辨率板和汽车距离像的 BM3D 和 NLM 的去噪结果。从图中可以看出,BM3D 去噪图像的目标和背景区域的灰度分布较均匀,NLM 算法则均残留少量噪点。在保持图像边缘上,BM3D 和 NLM 算法效果比较接近。从图像的客观评价指标来看,BM3D 和 NLM 的复原距离像的 R_{PSN} 值很接近,说明两者的去噪效果比较接近。从整体来看,NLM 算法由于还残留一些噪点,且主要为均匀分布噪声,说明其抑制均匀分布噪声能力不如 BM3D 强。但 BM3D 也存在一定的不足,如在图像某些边缘部分存在伪影。

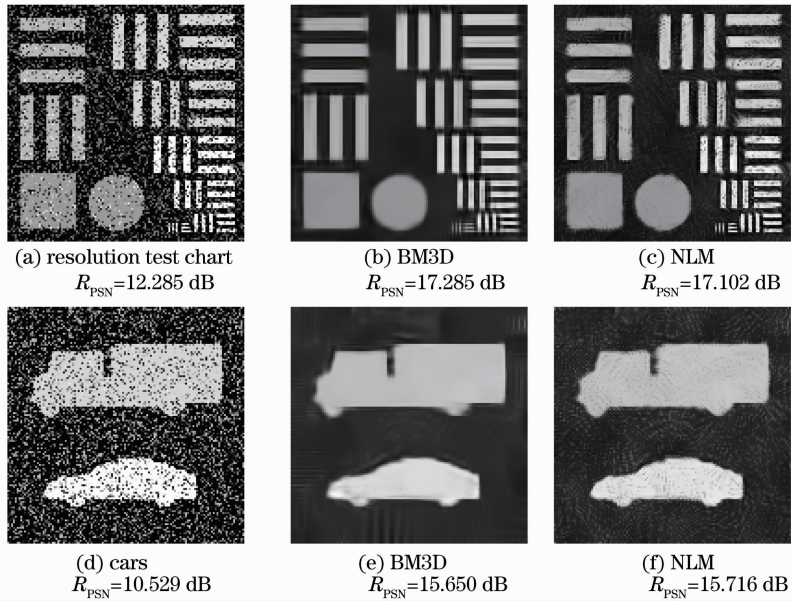


图 6 汽车距离像及 BM3D 和 NLM 的去噪结果

Fig. 6 Range image of resolution test chart and cars and denoised results by BM3D and NLM

对相干激光雷达距离像的去噪处理有其特殊性,还要考虑算法保持距离真值的能力。因此,分别计算分辨率板和汽车去噪图像中各目标均值间的差值,并与参考图像相比较。分辨率板各目标均值间的差值, BM3D 分别为差值 13.3、22.6 和 22.7, NLM 分别为差值 20.3、20.0 和 21.4,与参考图像相比,分辨率板的最小误差 BM3D 为 9.3, NLM 为 10.6。对于汽车图像目标均值间的差值, BM3D 为 20.8,误差为 11.2, NLM 为 24.7,误差为 7.3。综上所述, BM3D 和 NLM 算法用于距离像去噪,保持距离真值能力不强,误差较大。

4 结 论

本文采用 BM3D 和 NLM 两种去噪算法处理相干激光雷达图像,并对去噪结果进行了比较。仿真结果表明,1)在处理具有散斑噪声的相干激光雷达强度像时,结合同态变换的两种算法均有较好的去噪效果;同态 BM3D 算法明显好于同态 NLM 算法, BM3D 算法在保持目标区域的灰度分布均匀性、保持及恢复图像边缘等方面具有较好的性能;2)在处理含有均匀分布噪声和高斯噪声的相干激光雷达距离像时,直接应用 BM3D 和 NLM 算法去噪效果均不够理想。由于一般对距离像的处理更注重保持正确的距离值,这两种方法直接应用于距离像去噪误差较大,尚需要进一步改进。

参 考 文 献

- 1 A. B. Gschwendtner, W. E. Keicher. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, **12**(1): 383~396
- 2 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar [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
- 3 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
- 4 Chen Xiaoqing, Ma Junguo, Fu Qiang *et al.*. Range anomalies suppression method of coherent laser radar range image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 181~185
陈晓清, 马君国, 付强等. 相干激光成像雷达距离像距离反常抑制方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 181~185
- 5 Jacques G. Verly, Richard L. Delanoy. Model-based automatic target recognition (ATR) system for forwardlooking groundbased and airborne imaging laser radars (LADAR) [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2): 126~163
- 6 Wang Qi, Li Qi, Chen Zhe *et al.*. Range image noise suppression in laser imaging system [J]. *Opt. Laser Tech.*, 2009, **41**(2): 140~147
- 7 A. Buades, B. Coll, J. Morel. A non-local algorithm for image denoising [C]. *IEEE. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, 175~180
- 8 Kostadin Dabov, Alessandro Foi, Vladimir Katkovnik *et al.*. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2007, **16**(8): 2080~2095
- 9 Zhang Xile, Huang Jing, Liu Nan *et al.*. Wavelet-transform based low-dose CT projection filtering [J]. *CT Theory and Applications*, 2011, **20**(2): 163~171

- 张喜乐, 黄静, 刘楠等. 基于小波变换的低剂量 CT 投影数据滤波方法研究 [J]. *CT 理论与应用研究*, 2011, **20**(2): 163~171
- 10 Bi Yiming, Ma Jianhua, Liu Nan *et al.*. Anscombe transform and BM3D filtering based projection restoration for lowdose CT reconstruction [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, **46**(13): 216~220
- 毕一鸣, 马建华, 刘楠等. 基于 Anscombe 变换域 BM3D 滤波的低剂量 CT 重建 [J]. *计算机工程与应用*, 2010, **46**(13): 216~220
- 11 Liu Xiangle, Feng Xiangchu. Image denoising by mixing wavelet transformation with sparse 3D collaborative filtering [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, **46**(16): 185~187
- 刘向乐, 冯象初. 小波域三维块匹配图像去噪 [J]. *计算机工程与应用*, 2010, **46**(16): 185~187
- 12 Xia Zhiwei, Li Qi, Ding Shenghui *et al.*. Ladar intensity image denoising by non-local means algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100409
- 夏志伟, 李琦, 丁胜晖等. 基于非局部均值滤波的激光雷达强度像去噪研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100409
- 13 Li Qi, Xia Zhiwei, Ding Shenghui *et al.*. Denoising method for ladar range images based on non-local means [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s114001
- 李琦, 夏志伟, 丁胜晖等. 一种基于非局部均值的激光雷达距离像去噪算法 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s114001

栏目编辑: 马沂