

# 基于非局部均值的激光雷达距离像去噪算法

李琦 夏志伟 丁胜晖 王琪

(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** 提出了一种基于非局部均值(NLM)滤波的相干激光雷达距离像去噪方法,结合滤波后的强度像和原始距离像、背景抑制(B-S)后的中值滤波和 NLM 滤波等图像融合方法,实现 B-S 和距离反常抑制。对不同载噪比的相干激光雷达多目标仿真图像进行了去噪处理。比较了 Lee 滤波等方法处理结果。实验结果表明,采用该方法,能够满足距离像背景噪声抑制、目标上距离值正常和边缘保持三方面要求。

**关键词** 图像处理;去噪;非局部均值;相干激光雷达;距离像

**中图分类号** TP751.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s114001

## Denoising Method for Ladar Range Images Based on Non-Local Means

Li Qi Xia Zhiwei Ding Shenghui Wang Qi

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

**Abstract** A denoising method for coherent ladar range images is proposed based on non-local means (NLM) filtering. Combined with image fusion methods for images such as range image and filtered intensity image, median filter and NLM with background suppression (B-S), B-S and range anomalies can be realized. Image denoising are carried out on simulated coherent ladar multi-target images with different carrier to noise ratios, and the performances are compared with some other methods such as Lee filter. The results show that, the proposed method can satisfy the requirements from the aspects of background noise suppression, normal range values on the target and edge-preservation.

**Key words** image processing; denoising; non-local means; coherent ladar; range image

**OCIS codes** 100.2000; 110.6880; 280.3640; 100.3008

## 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,因此受到极大的关注<sup>[1,2]</sup>。随着激光技术和探测器件的进步,激光主动成像研究向小型、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<sup>[3~6]</sup>。相干激光雷达距离像与强度像存在一一对应关系,其噪声主要表现为加性噪声,其图像复原可通过与强度像的图像融合及顺序统计滤波、形态滤波等算法加以解决<sup>[4~6]</sup>。

非局部均值(NLM)算法是 2005 年由 Buades

等<sup>[7]</sup>提出的。其主要特点是用基于块的相似性代替传统统计类滤波中基于点的相似性。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>[8~11]</sup>。本课题组曾用此方法对简单背景下 CO<sub>2</sub> 相干激光雷达强度像进行了初步的去噪处理效果研究,获得了较好结果<sup>[12]</sup>。

目前,尚无基于 NLM 滤波方法用于相干激光成像雷达距离像去噪处理的研究报道。本文针对多目标复杂背景相干激光雷达图像,提出了一种基于 NLM 滤波的距离像去噪方法;结合强度像和距离像、不同去噪距离像之间的像素级融合方法,实现背景抑制(B-S)和距离反常抑制;并对不同载噪比(CNR)的相干激光雷达多目标仿真图像进行了去噪处理。

收稿日期: 2011-08-02; 收到修改稿日期: 2010-09-09

作者简介: 李琦(1963—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光主动成像及太赫兹成像技术等方面的研究。E-mail: hit\_liqi@yahoo.com.cn

## 2 距离像去噪算法原理

### 2.1 NLM 算法

NLM 算法<sup>[7,12]</sup>的基本思想是:像素点的灰度值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,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。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:

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

式中权重  $\omega(i,j)$  依赖于像素  $i$  与像素  $j$  之间的相似性,并满足  $0 \leq \omega(i,j) \leq 1$  且  $\sum_j \omega(i,j) = 1$ 。

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  $n_i$  和  $n_j$  为  $N_i$  和  $N_j$  中处于相同位置的像素灰度值,权重定义为

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

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

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

式中  $d_i$  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。

### 2.2 图像融合的距离像去噪算法

所提出的相干激光雷达距离像去噪算法由 3 部分组成。首先,通过距离像和强度像的数据融合,实现距离像 B-S;然后,分别通过 NLM 滤波算法和中值滤波算法进行初步距离反常抑制;最后,通过加权,将第二部分的两个去噪后的距离像进行数据融合,得到最终去噪结果。

算法中第一部分的强度像首先采用 NLM 滤波算法去噪得到强度图像  $I_{\text{NLM}}$ ,然后根据其整帧均值

$\bar{I}_{\text{NLM}}$  判断目标和背景区域。表达式为

$$I_{\text{NLM}}(i,j) \begin{cases} \in \text{background}, & I_{\text{NLM}}(i,j) < a\bar{I}_{\text{NLM}} \\ \in \text{objects}, & I_{\text{NLM}}(i,j) \geq a\bar{I}_{\text{NLM}} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $a$  为加权系数。然后,B-S 的距离像  $R_b(i,j)$  可表示为

$$R_b(i,j) = \begin{cases} 0, & I_{\text{NLM}}(i,j) \in \text{background} \\ R(i,j), & I_{\text{NLM}}(i,j) \in \text{objects} \end{cases} \quad (6)$$

即属于目标的距离像保持原值  $R(i,j)$ ,属于背景部分的距离像赋值为 0。

算法的第二部分中的 NLM 滤波算法采用两级滤波,即选择不同的参数  $h$  进行两次 NLM 滤波,从而尽可能在去噪时更多地保留目标细节。

算法的第三部分将第二部分获得的 NLM 滤波后的距离像  $R_{\text{bNLM}}(i,j)$  和中值滤波后的距离像  $R_{\text{bmed}}(i,j)$  进行像素级融合,融合后图像  $R_{\text{new}}(i,j)$  表达式为

$$R_{\text{new}}(i,j) = fR_{\text{bmed}}(i,j) + (1-f)R_{\text{bNLM}}(i,j), \quad (7)$$

式中  $f$  为图像融合控制参数。

整个算法实现框图如图 1 所示。为了更好地分析距离像处理结果,计算了原始和处理后的距离像的均方根误差(RMSE):

$$\epsilon_{\text{RMSE}} = \left\{ \sum \sum [\hat{R}(i,j) - R_0(i,j)]^2 / (MN) \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

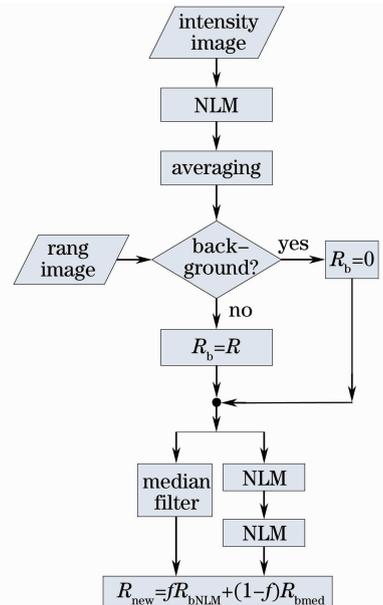


图 1 算法实现框图

Fig. 1 Block diagram of algorithm implementation

式中  $\hat{R}(i, j)$  表示原始和处理后的距离像,  $R_0(i, j)$  表示原始模型,  $M$  和  $N$  分别表示所计算图像的行数和列数。

### 3 去噪结果及分析

NLM 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 NLM 的控制系数。中值滤波一律采用  $3 \times 3$  窗口。

考虑激光雷达距离单元等于距离分辨率情况,

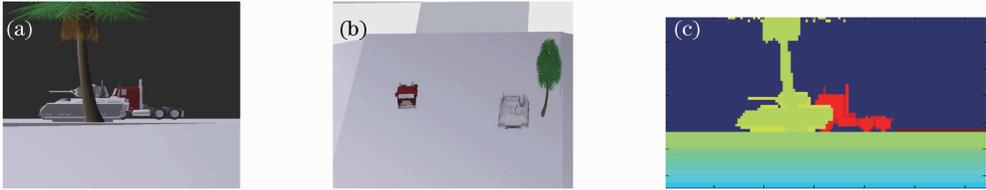


图2 场景视图和原始模型。(a)场景主视图;(b)场景俯视图;(c)原始模型

Fig. 2 Simulation environment and initial model. (a) Front view of environment; (b) top view of environment; (c) initial model

CNR 是激光雷达的重要参数, 表示雷达中频放大器接收的平均信号功率与本振散粒噪声平均功率的比值。图3给出坦克 CNR 为 12 dB 时, 仿真生成的含噪距离像和强度像(256 灰度级), 其中, 车、树、土地和大气的 CNR 分别为 5.64, 3.6, 2.88 和 1.2 dB。显然, 此时强度像和距离像噪声很大。由

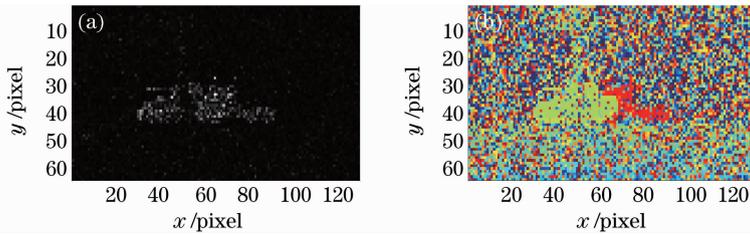


图3 原始强度像和距离像。(a)强度像;(b)距离像

Fig. 3 Origin intensity and range images. (a) Intensity image; (b) range image

图4给出了融合 NLM( $c=0.3$ ) 滤波的强度像的激光雷达距离像去噪结果。选择两个 B-S 控制参数  $a=1$  和 0.95, 3 个 NLM 算法控制参数  $c=0.4$ , 0.5 和 0.9。由图4可见, B-S 后的距离像细节保留较好, 比如图4(b)和图4(e)中炮筒受较少的干扰, 同时土地也因判为目标被保留原值; 随后的中值滤波将细节(包括土地)损失了, 特别是对  $a=1$  时的 B-S 后的距离像进行中值滤波细节损失严重, 但坦克和车的主体的大部分距离偏差不大; B-S 后的距离像经 NLM 滤波如炮筒等细节能够保留, 土地也较图4更分明, 但大气部分噪声较大, 整体效果不够好。

即只考虑存在距离反常时的均匀分布噪声, 不考虑距离正常时存在高斯噪声。选择具有多目标的场景如图2(a)和(b)所示。场景中有坦克、车、树和土地。场景生成的原始模型如图2(c)所示, 图像大小  $64 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ , 距离像 32 灰度级; 一个像素所表示的空间间隔为 0.3 m, 坦克的长度为 30 pixel 左右, 炮筒仅占一行中 12 pixel 左右。坦克、车、树和土地各自由不同的距离值构成, 另外, 又有像炮筒这样单行少像素的细节, 并且坦克有树木遮挡、坦克与车互扰, 因此, 此场景较为复杂。

于大气载噪比最低, 因此, 平均强度值最低; 坦克平均强度值最高, 但受树木遮挡中间有暗条, 坦克和车难于区分。距离像模糊, 大气距离值偏差最大, 坦克和车距离偏差较小, 绝大部分炮筒距离正常, 坦克、车和土地基本无法看出层次, 坦克和车依稀可分。

表1给出原始仿真激光雷达距离像和图4中处理后的距离像的 RMSE。可见,  $a=1$  时的 B-S 距离像的 RMSE 低于其后的中值滤波结果, 这与图4(c)视觉效果相一致, 过多地损失了距离信息; 经两级 NLM 的距离像图4(h)的 RMSE 最小, 主要因为土地距离偏差较小, 而土地约占整个图像的 1/3。

为了解决图4中在保留细节时大气和土地噪声较大问题, 采用降低强度像的 NLM 滤波参数  $c$  的方法。图5给出了利用 NLM( $c=0.1$ ) 滤波强度像的激光雷达距离像去噪结果, B-S 控制参数  $a=1$ , NLM 算法控制参数  $c=0.5$  和 0.9。图5和图4比较可

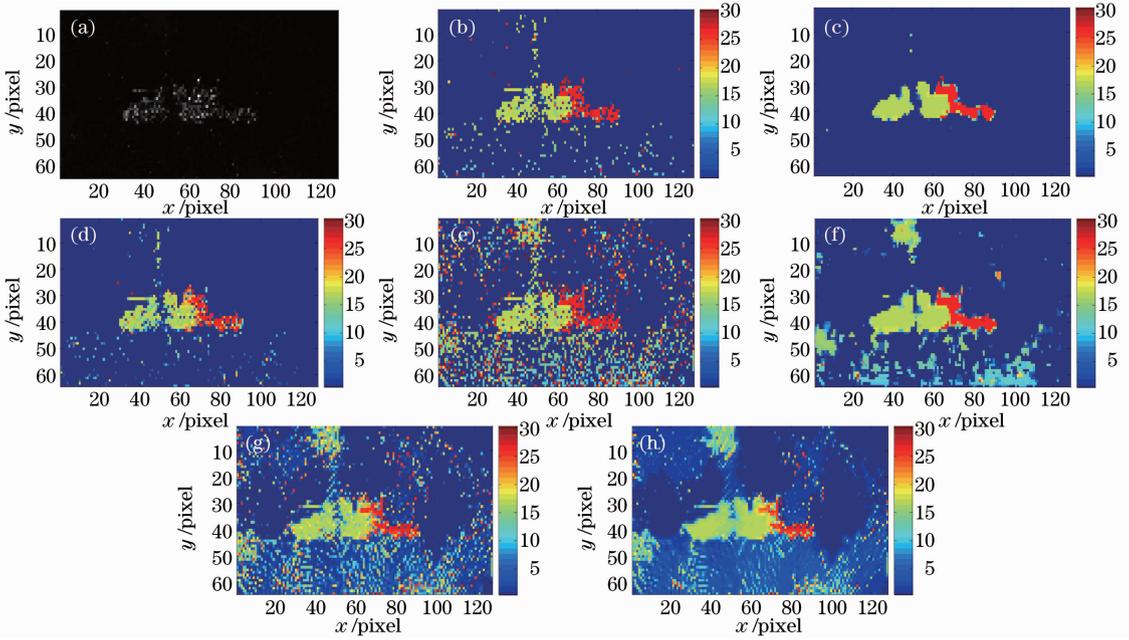


图 4 利用 NLM( $c=0.3$ )滤波强度像的距离像去噪结果。(a) NLM 后的强度像( $c=0.3$ );(b) B-S( $a=1$ );(c)图(b)经中值滤波;(d)图(b)经 NLM( $c=0.4$ );(e) B-S( $a=0.95$ );(f)图(e)经中值滤波;(g)图(e)经 NLM( $c=0.4$ );(h)图(g)经 NLM( $c=0.5$ )

Fig. 4 Denoising results of range image with NLM filtering of intensity image ( $c=0.3$ ). (a) Intensity image by NLM ( $c=0.3$ ); (b) B-S ( $a=1$ ); (c) Fig. (b) by median filter; (d) Fig. (b) by NLM ( $c=0.4$ ); (e) B-S ( $a=0.95$ ); (f) Fig. (e) by median filter; (g) Fig. (e) by NLM ( $c=0.4$ ); (h) Fig. (g) by NLM ( $c=0.5$ )

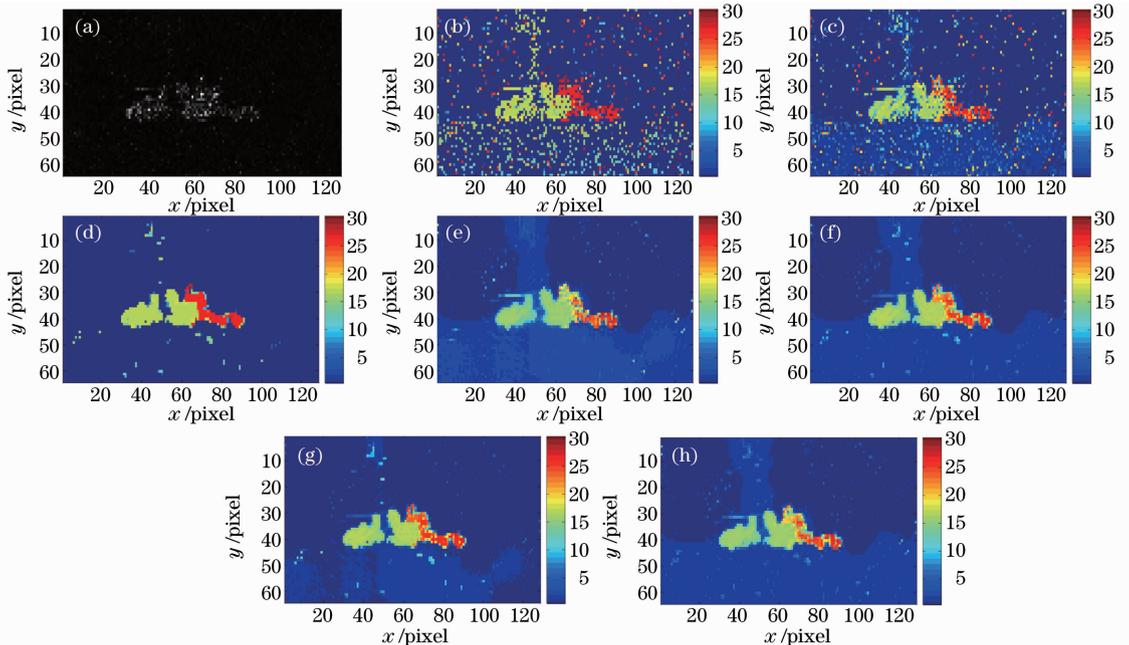


图 5 利用 NLM( $c=0.1$ )滤波强度像的距离像处理结果。(a) NLM 后的强度像( $c=0.1$ );(b) B-S( $a=1$ );(c)图(b)经中值滤波;(d)图(b)经 NLM( $c=0.5$ );(e)图(d)经 NLM( $c=0.9$ );(f)图(e)和图(c)融合( $f=0.5$ );(g)图(e)和图(c)融合( $f=2/3$ );(h)图(e)和图(c)融合( $f=1/3$ )

Fig. 5 Denoising results of range image with NLM filtering of intensity image ( $c=0.1$ ). (a) Intensity image by NLM ( $c=0.1$ ); (b) B-S ( $a=1$ ); (c) Fig. (b) by median filter; (d) Fig. (b) by NLM ( $c=0.5$ ); (e) Fig. (d) by NLM ( $c=0.9$ ); (f) fusion Fig. (e) and Fig. (c) ( $f=0.5$ ); (g) fusion Fig. (e) and Fig. (c) ( $f=2/3$ ); (h) fusion Fig. (e) and Fig. (c) ( $f=1/3$ )

表 1 图 4 中距离像的 RMSE

Table 1 RMSE of range image in Fig. 4

Image	Fig. 4(b)	Fig. 4(c)	Fig. 4(d)	Fig. 4(e)	Fig. 4(f)	Fig. 4(g)	Fig. 4(h)
Value	8.952	9.056	8.909	9.496	7.876	7.944	7.092

见;B-S后的距离像经两级 NLM 滤波,坦克整体噪声减少,同时如炮筒等细节得到保留;土地可与大气区分,且噪点减少,只是绝对距离值偏低。由于在图 5(c)中的中值滤波后的坦克和车主体部分距离值大部分与模型相同,因此在图 5(c)和图 5(e)融合时,选择融合控制参数  $f=0.5$  更能达到满足距离像背景噪

声抑制、目标上距离值正常和边缘保持三方面要求。

表 2 给出原始仿真激光雷达距离像和图 5 中处理后的距离像的 RMSE。从表中可见,整帧图像经两级 NLM 达到最小; $f=0.5$  和  $f=1/3$  时 RMSE 差别很小, $f=0.5$  的 RMSE 最小,这也说明,融合控制参数  $f=0.5$  图像融合效果最好。

表 2 图 5 中距离像的 RMSE

Table 2 RMSE of range image in Fig. 5

Image	Fig. 5(b)	Fig. 5(c)	Fig. 5(d)	Fig. 5(e)	Fig. 5(f)	Fig. 5(g)	Fig. 5(h)
Value	9.297	8.98	8.53	8.082	8.331	8.5839	8.344

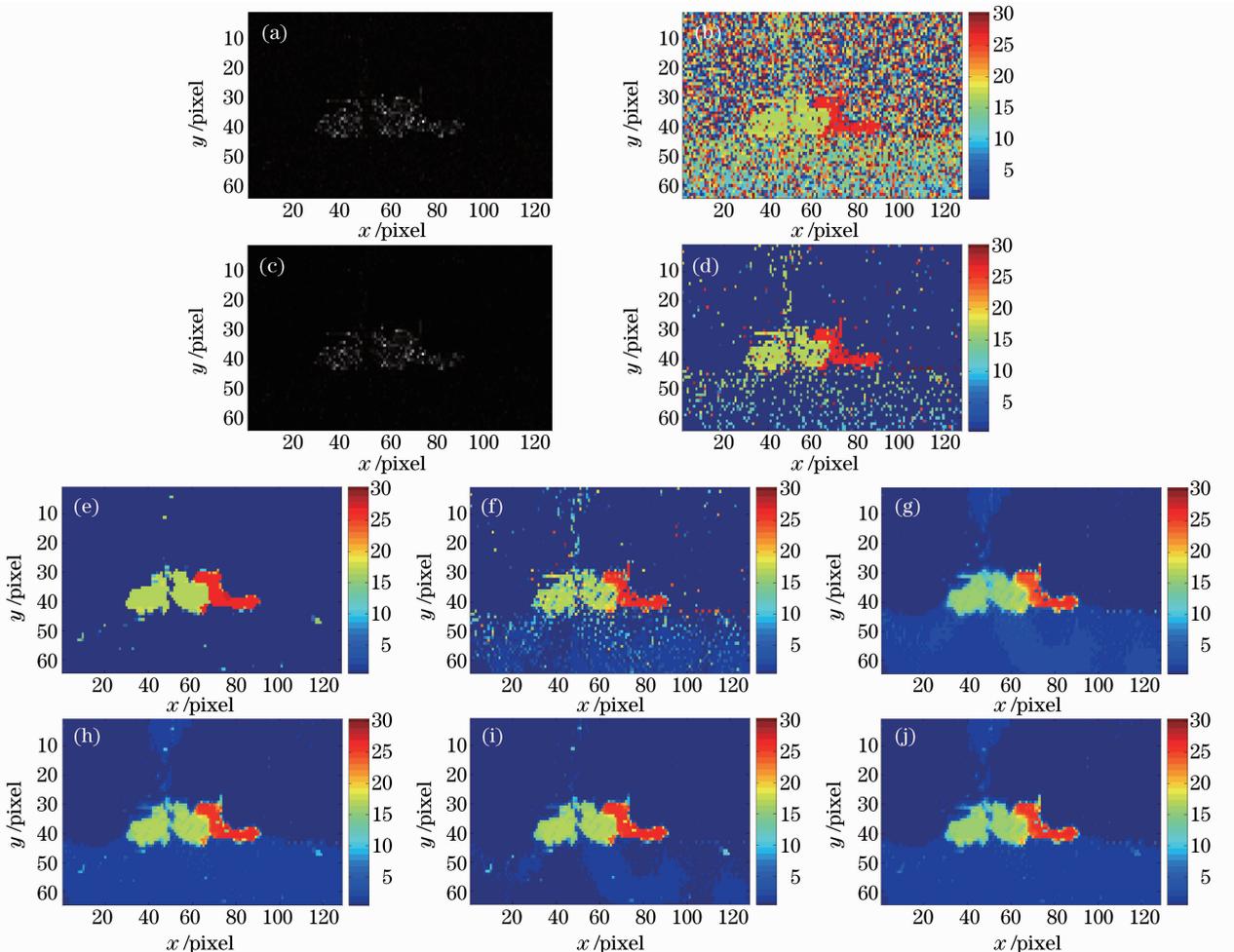


图 6 原始仿真图像及距离像去噪结果(坦克 CNR=14 dB)。(a)原始强度像;(b)原始距离像;(c) NLM 后的强度像( $c=0.1$ );(d) B-S( $a=1$ );(e)图(d)经中值滤波;(f)图(d)经 NLM( $c=0.5$ );(g)图(f)经 NLM( $c=0.9$ );(h)图(f)和图(e)融合( $f=0.5$ );(i)图(f)和图(e)融合( $f=2/3$ );(j)图(f)和图(e)融合( $f=1/3$ )

Fig. 6 Origin simulation image and denoising results of range image (tank CNR=14 dB). (a) Origin intensity image; (b) origin range; (c) intensity image by NLM( $c=0.1$ ); (d) B-S ( $a=1$ ); (e) Fig. (d) by median filter; (f) Fig. (d) by NLM( $c=0.5$ ); (g) Fig. (f) by NLM( $c=0.9$ ); (h) fusion Fig. (f) and Fig. (e) ( $f=0.5$ ); (i) fusion Fig. (f) and Fig. (e) ( $f=2/3$ ); (j) fusion Fig. (f) and Fig. (e) ( $f=1/3$ )

另外,研究了坦克、车、树、土地和大气的 CNR 分别为 14, 6.58, 4.2, 3.36 和 1.4 dB 时的距离像去噪。图 6 给出了采用本文所提方法的处理结果。显然,由于激光雷达噪声减少,处理效果好于图 5。由于实际应用中更看重重要目标上的距离偏差,因此,取 26~43 行、28~92 列像素(坦克和车)组成的子图像进行 RMSE 分析,其原始模型如图 7 所示。

表 3 给出图 6 中距离像的整帧图像和子图像的 RMSE。从表 3 中可见,  $f = 0.5$  和  $f = 1/3$  时 RMSE 差别很小;对整帧图像,融合控制参数  $f = 0.5$  图像融合效果最好;对于子图像,  $f = 1/3$  最好,这主要是因为炮筒细节距离偏差更小。另外,从表 3 可以看出更重要的一点:子图像的 RMSE 从原

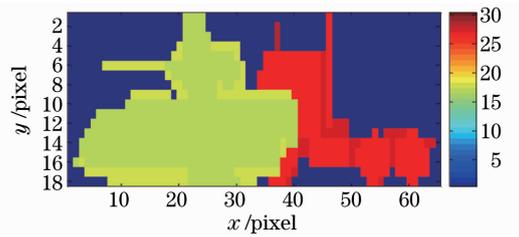


图 7 子图像原始模型

Fig. 7 Sub-image initial model

始距离像到  $f = 0.5$  的融合后的距离像一直呈下降趋势,与整帧图像经两级 NLM 达到最小不同。这进一步说明,本文所提方法对多目标距离像去噪更有效。

表 3 图 6 中距离像的 RMSE

Table 3 RMSE of range image in Fig. 6

Image size	origin	Fig. 6(d)	Fig. 6(e)	Fig. 6(f)	Fig. 6(g)	Fig. 6(h)	Fig. 6(i)	Fig. 6(j)
Whole image(64 pixel×128 pixel)	13.383	8.540	8.835	8.191	8.035	8.195	8.5813	8.198
Sub-image(18 pixel×65 pixel)	12.149	7.554	6.405	6.372	5.556	5.493	5.7510	5.487

为了进一步检验本文所提方法性能,采用 Lee 滤波对仿真原始强度像进行去噪处理,以此区分目标和背景。Lee 滤波是典型的散斑噪声抑制方法,在去噪的同时对细节有一定的保护。文中 Lee 滤波采用  $3 \times 3$  窗口。图 8 给出了处理结果,B-S 控制参数  $a=1$ ,两个 NLM 算法控制参数  $c$ 。从图中可见:通过 Lee 滤波后,B-S 的距离像中坦克和车凸现出来,但炮筒细节变粗;树木较多被保留。对 B-S 后的距离像直接进行中值滤波,坦克和车总体较清晰,但

炮筒等细节畸变。对 B-S 后的距离像应用 NLM 算法,当  $c=0.5$  时,细节保留较多,但坦克和车的距离均匀性较差。图 8(d)给出分别经  $c=0.5$  和  $c=0.3$  的两级 NLM 滤波后的距离像,显然效果要比单级好。显然,采用 Lee 滤波对仿真原始强度像进行距离像去噪处理的中值滤波和两级 NLM 滤波效果均不及本文所用方法中的相应中间结果;都使坦克细节(炮筒)畸变。

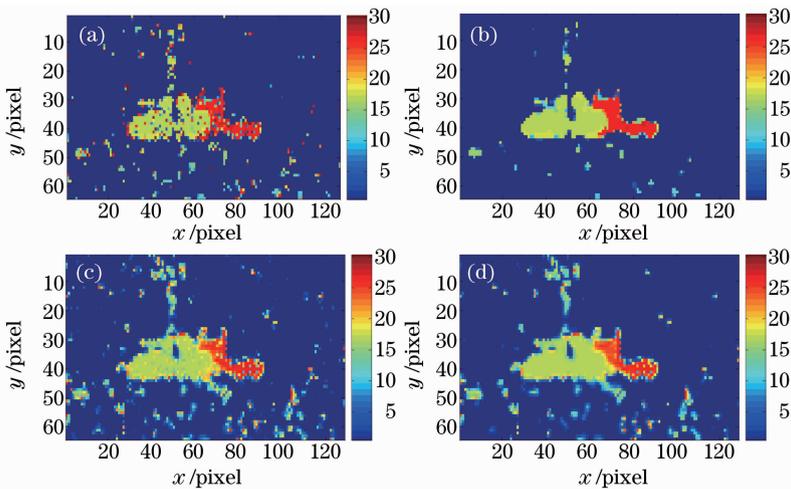


图 8 强度像 Lee 滤波后的距离像去噪结果。(a) B-S( $a=1$ );(b)图(a)经中值滤波;(c)图(b)经 NLM  $c=0.5$ ; (d)图(c)经 NLM ( $c=0.3$ )

Fig. 8 Denoising results of range image with Lee filtering of intensity image. (a) B-S ( $a=1$ ); (b) Fig. (a) by median filter; (c) Fig. (b) by NLM ( $c=0.5$ ); (d) Fig. (c) by NLM ( $c=0.3$ )

## 4 结 论

针对复杂背景多目标相干激光雷达仿真图像, 强度像分别采用不同控制参数的 NLM 滤波, B-S 距离像分别采用中值滤波、两级 NLM 滤波和像素级融合, 进行了距离像去噪效果比较。另外, 也与采用 Lee 滤波对仿真原始强度像去噪处理进行了比较。实验结果表明, 采用本文提出的方法, 能够满足距离像背景噪声抑制、目标上距离值正常和边缘保持三方面要求; 强度像 NLM 滤波控制参数  $c=0.1$ 、B-S 控制参数  $a=1$ 、距离像两级 NLM 滤波控制参数  $c=0.5$  和  $0.9$ 、融合控制参数  $f=0.5$  时, 距离像去噪效果最好。

## 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 lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 566~568  
周煌, 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 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, 王骥等. 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
- 5 J. G. Verly, R. L. Delanoy. Model-based automatic target recognition (ATR) system for forward-looking ground-based 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 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
- 9 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
- 10 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
- 11 Yang Xuezhong, Shen Jing, Fan Lianghua. 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
- 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

栏目编辑: 李文喆