

文章编号: 0253-2239(2003)05-0541-06

# 相干激光雷达图像散斑噪声抑制算法\*

蒋立辉<sup>1,2</sup> 赵春晖<sup>2</sup> 王 骥<sup>3</sup>

1 哈尔滨工程大学信息与通信工程系, 哈尔滨 150001  
2 中国民用航空学院信息与通信工程系, 天津 300300  
3 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001

**摘要:** 提出了一种新的用于散斑噪声抑制的非线性加权均值多方向形态滤波算法。运用此算法和先前提出的散斑噪声抑制算法以及小波软阈值算法和 Lee 滤波算法一并对相干激光雷达图像进行了噪声抑制处理, 并且对处理的结果进行了比较, 证明了本算法的进步, 即在不降低噪声抑制能力的前提下, 较好地保持了图像边缘。

**关键词:** 散斑噪声抑制; 形态滤波算法; 相干激光雷达; 非线性权重; 图像

中图分类号: TN911.74 文献标识码: A

## 1 引 言

相干激光雷达、合成孔径雷达、声学成像和红外医学成像等都不可避免地受到散斑噪声的污染<sup>[1]</sup>。由于散斑噪声的存在, 使它们的图像的可解释性和判读性变差, 严重地影响了图像的进一步处理和自动分析效率。尤其在激光主动成像精确制导中, 其图像的散斑噪声抑制问题更突出, 而且算法的要求更加苛刻, 既要有很强的噪声抑制能力, 又要有很好的边缘和细节保持能力, 当然也必须要有较高的处理效率。为此我们对散斑噪声的抑制算法进行了深入的研究, 并提出了一些改进算法: 同态单均值滤波算法<sup>[2]</sup>、同态模糊多级中值滤波算法<sup>[3]</sup>和多方向加权均值形态滤波算法<sup>[4,5]</sup>。本文提出了非线性加权均值多方向形态滤波算法, 此算法有更简单的权重计算方法, 只需简单的加、乘和除计算就可获得其权重, 而并行加权多方向形态滤波算法除此之外还需做指数运算, 这较其算法的复杂性降低, 运算效率更高。在这里, 我们运用这些算法来处理脉冲相干激光雷达图像, 并且通过处理结果的比较, 优选出适合相干激光雷达图像散斑噪声抑制的滤波算法: 非线性加权均值多方向形态滤波算法。

\* 国家自然科学基金(60172038), 全国优秀博士论文作者专项基金(200037), 教育部优秀青年教师(EYTP), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(TRAPOYT), 黑龙江省自然科学基金(F01-03)资助课题。

E-mail: jlh-hit@sohu.com

收稿日期: 2002-05-27

这里要指出的一点是: 形态滤波本身就是一种层迭滤波, 它的基本操作可以用“与”、“或”逻辑实现, 易于超大规模集成电路实现<sup>[6]</sup>, 因此它可较方便地做到图像的实时处理。

## 2 相干激光雷达

我们这里给出的是外差式脉冲相干激光雷达, 它主要有如下部件或分系统组成: CO<sub>2</sub> 激光器、HgCdTe 探测器、光学系统(主要包括扩束分系统和光学天线)、扫描系统、高速信息处理系统、信号处理和成像系统(如图 1 所示)。这种雷达的工作原

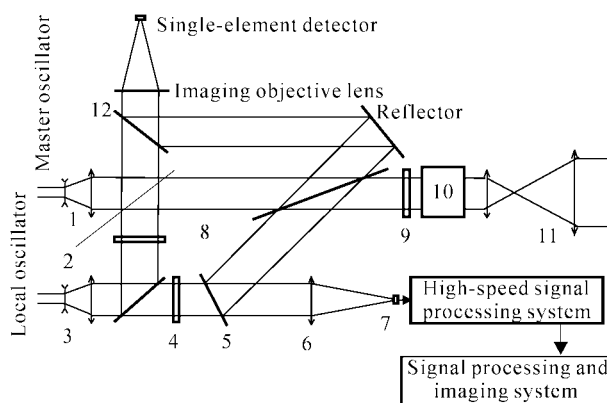


Fig. 1 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> impulse coherent imaging laser radar. 1: beam expander; 2: 1/2 wave plate; 3: spectroscope; 4: attenuating plate; 5: signal combiner; 6: imaging objective lens; 7: single-element detector; 8: Brewster plate; 9: 1/4 wave plate; 10: two-dimensional scanner; 11: transmitting-receiving antenna; 12: frequency stabilized beam combiner

理为:p 偏振方向的主振激光通过四分之一波片变换成圆偏振光,再经过二维扫描镜,由发射天线发射到目标;经目标散射后,由接收天线接收,通过四分之一波片变换成 s 方向的偏振光,并与本振光合束,经成像物镜汇聚到探测器表面,接收外差信号。最后由高速信息处理系统和信号处理系统对信号进行处理,最后获得目标强度像。

相干激光雷达的回波信号中存在散斑噪声,这已被实验所证实<sup>[7]</sup>。

### 3 非线性加权均值多方向形态滤波算法

#### 3.1 结构元素的选择

结构元素的选择应根据噪声的统计性质。我们知道这里的散斑噪声是乘性的,它造成图像灰阶剧烈变化。因此即使取最小的方型 3×3 结构元素也可能

包含一个或几个受散斑噪声污染的而变得尖锐的极大、极小的像素灰度值。所以,为了尽可能地抑制散斑噪声,我们选用了线性结构元素(图 2)。

#### 3.2 算法设计

取如图 2 所示的结构元素,结构元素长度为  $p=[3,5]$ ,与水平方向的夹角为  $u=[0,45,90,135]$ ;  $X(m,n)$  为输入信号,  $Y(m,n)$  为输出信号。首先采用结构元素,  $j=1, i=1,2,3,4$  对输入图像信号  $X(m,n)$  做形态开-闭和闭-开操作。  $a_{p(j),u(i)}$ 、 $a'_{p(j),u(i)}$  为权重因子,则权重平均级联形态滤波算法,第一步操作为

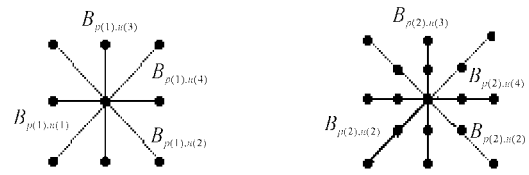


Fig. 2 Linear structuring elements

$$F_{p(j),u(i)}(m,n) = \{ [X(m,n) \circ B_{p(j),u(i)}] \bullet B_{p(j),u(i)} \}(m,n) \quad i = 1,2,3,4; \quad j = 1, \quad (1)$$

$$F'_{p(j),u(i)}(m,n) = \{ [X(m,n) \bullet B_{p(j),u(i)}] \circ B_{p(j),u(i)} \}(m,n) \quad i = 1,2,3,4; \quad j = 1, \quad (2)$$

上式中  $\circ$  表示形态开运算,  $\bullet$  表示形态闭运算。  $F_{p(j),u(i)}(m,n)$ 、 $F'_{p(j),u(i)}(m,n)$  分别为输入信号的使用不同结构元素形态开-闭和闭-开滤波的结果,下标  $p(j)$ 、 $u(i)$  分别为线性结构元素的尺度和与水平方向的夹角。

散斑噪声对信号污染严重,选择了如图 2 形式的结构元素,这对有效地抑制散斑噪声固然是必要的。但是,由于线性结构元素所包含的像元素较少,它们极有可能都是被散斑噪声污染的,而形态开-闭和闭-开的滤波特点是在与结构元素匹配的噪声图像区域寻找出没有被噪声污染的像素以替换滤波窗的中心像素,因此无论怎样处理,最后选择的还是被噪声污染的像素。所以,为了更有效地抑制散斑噪声,我们根据散斑的统计特征,对形态开-闭和闭-开的处理结果进行加权平均以进一步抑制散斑噪声。根据散斑的概率统计分布,  $P(I) = \exp(-I/\langle I \rangle)$ ,

可以推断出,出现大于平均强度  $\langle I \rangle$  的概率小,而出现小于平均强度  $\langle I \rangle$  的概率大,若采取  $[1/N, \dots, 1/N]$  ( $N$  为加权运算的样本数) 的权重系数,显然处理后的灰度要低于实际的灰度,失去了灰度保持能力。因此我们给以不同结构元素形态开-闭、闭-开处理后灰度值大的赋以高的权重,具体方法如下:

$$\text{sum}x_{p(i)}(n) = \sum_{i=1}^4 [F_{p(j),u(i)}(n) + F'_{p(j),u(i)}(n)], \quad j = 1 \quad (3)$$

$$a_{p(j),u(i)}(n) = \frac{F_{p(j),u(i)}(n)}{\text{sum}x_{p(j)}(n)}, \quad j = 1 \quad (4)$$

$$a'_{p(j),u(i)}(n) = \frac{F'_{p(j),u(i)}(n)}{\text{sum}x_{p(j)}(n)}, \quad j = 1 \quad (5)$$

$x_{p(j)}(n)$  为不同方向相同尺度线性结构元素形态开-闭、闭-开处理结果的和。则此算法的第一阶段波分复用输出结果为

$$Y_{p(j)}(m,n) = \frac{1}{4} \sum_{j=1, i=1}^4 [a_{p(j),u(i)} F_{p(j),u(i)} + a'_{p(j),u(i)} F'_{p(j),u(i)}](m,n), \quad j = 1, \quad (6)$$

算法的第二阶段操作仅用  $j = 2$  代替  $j = 1$ ,  $X(m,n) = Y_{p(j)}(m,n)$ , 重复(1)式~(6)式的操作即可,所得到的输出结果为  $Y(m,n) = Y_{p(2)}(m,n)$ 。

本算法以形态滤波为理论出发点,在选取结构

元素上结合了散斑噪声的统计特性,又在加权上利用了散斑噪声的统计分布,而且以不同尺度的结构元素经两个阶段形态操作和加权平均,期望在保持图像边缘的前提下,获得较大幅度的散斑噪声抑制

效果。下面通过对脉冲相干激光雷达图像的处理, 检验我们算法的有效性。

### 4 实验测试

理论和实验都证明了脉冲相干激光雷达散斑噪声的存在, 而且它是脉冲相干激光雷达中最为主要的噪声来源。现在应用我们课题组建立的脉冲相干激光雷达实验系统, 拍摄了多幅图像, 其像素为  $32 \times 64$ 。图 3 为 2.4 km 外的目标图像, 图 4 为每点经五次测量而获得的一幅噪声图像, 图 5、图 6、图 7、图 8、图 9 和图 10 分别为本文的非线性加权均值多方向形态滤波算法、方向加权均值形态滤波算法<sup>[4]</sup>、局部统计同态 Lee 滤波算法<sup>[8]</sup>、小波软阈值算法<sup>[9]</sup>、同态罩均值滤波(两次迭代)和同态模糊多级中值滤波算法(两次迭代)处理后的图像。从中我们可以看出多方向加权均值形态滤波算法与小波软阈



Fig. 3 Original image

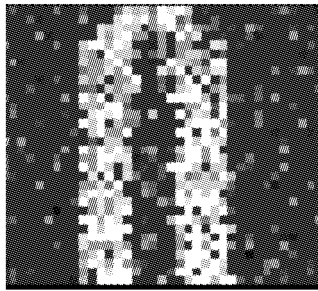


Fig. 4 Laser radar imagery

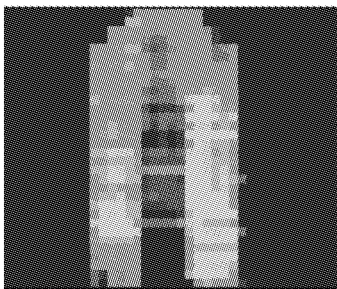


Fig. 5 Result of the filtering algorithm in this paper

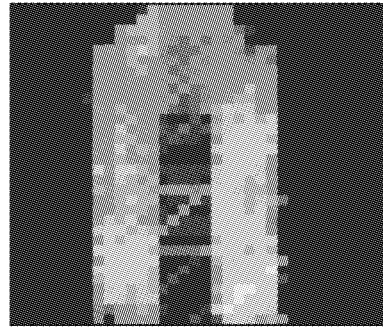


Fig. 6 Result of the multidirection weight averaging morphological filtering algorithm in Ref. [4]

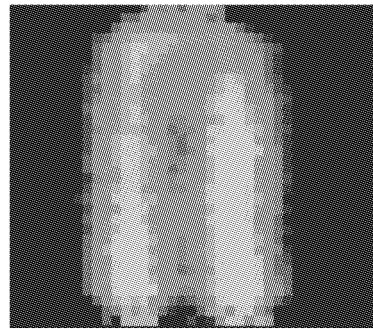


Fig. 7 Result processed by local statistics-homomorphic filter

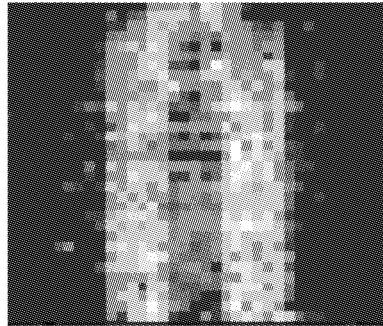


Fig. 8 Result processed by wavelet soft thresholding algorithm

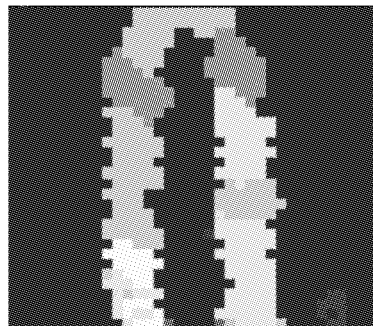


Fig. 9 Result filtered homomorphic mask-m filter (two iteration)

值算法较好地保持了图像边缘。为了比较不同算法

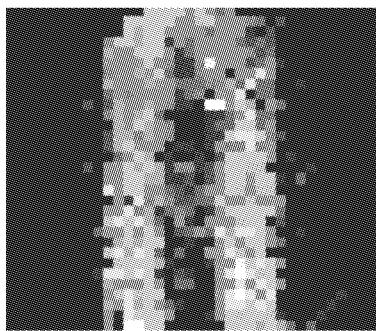


Fig. 10 Image filtered by using the algorithm of Homomorphic-fuzzy multilevel median filter (two iterations)

在处理脉冲相干激光雷达实际图像时的散斑噪声抑制能力,根据标志算法抑制散斑噪声能力的散斑指数<sup>[10]</sup>,计算了上述算法处理结果的散斑指数,结果列于表 1 中。从表 1 中可以看到,多方向加权均值形态滤波算法、本文的多方向加权均值形态滤波算法与局部统计同态 Lee 滤波算法的处理结果的散斑指数分别为 0.0787、0.0743 和 0.0840,它们抑制散斑噪声的能力几乎相当,而且与原图像的散斑指数 (0.2671) 相比压缩噪声的幅度较大。这些较好地符合了我们仿真实验的结果及测试图像目标均方误差的计算结果。

Table 1 Speckle index about laser radar imagery (2.6 km) and processed image

Laser radar imagery (2.6 km) and algorithm	Speckle index
Laser radar imagery (2.6 km)	0.2671
Lee' local statistics filter	0.0840
Multidirectional weight averaging morphological filtering algorithm	0.0787
The filtering algorithm in this paper	0.0743
Wavelet soft-thresholding algorithm	0.1057
Homomorphic mask-mean filter (two iteration)	0.0982
Homomorphic-fuzzy multilevel median filter (two iterations)	0.1212

为了进一步验证和比较散斑噪声抑制算法的有效性和稳定性,我们又对激光雷达 1.86 km 的图像进行了处理。图 11 为此目标原图像,图 12 为激光雷达图像,图 13、图 14、图 15、图 16、图 17 和图 18 分别为文献[6]的多方向加权均值形态滤波算法、本文的多方向加权均值形态滤波算法、局部统计同态 Lee 滤波算法、小波软阈值算法、同态罩均值滤波(两次迭代)和同态模糊多级中值滤波算法(两次迭代)处理后的图像。从图像处理 and 表 2 的散斑指数计算结果来分析,其结论与上面的处理结果是一致的,即文献[6]

的多方向加权均值形态滤波算法和本文的多方向加权均值形态滤波算法较好的保持了图像的边缘几何结构,而且具有较强的散斑噪声抑制能力。

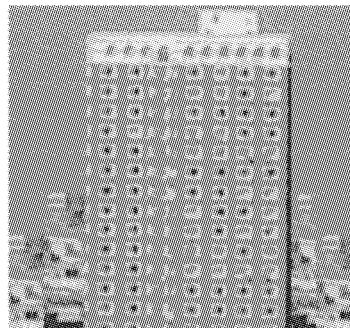


Fig. 11 Original image

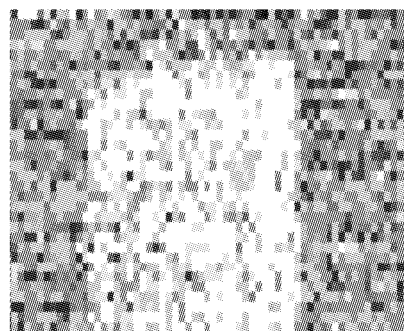


Fig. 12 Laser radar imagery

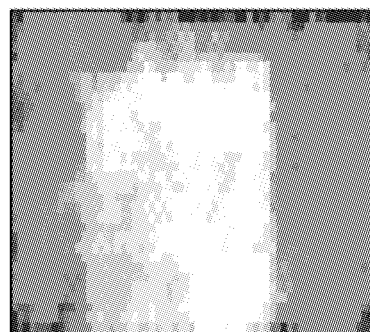


Fig. 13 Result of the filtering algorithm in this paper

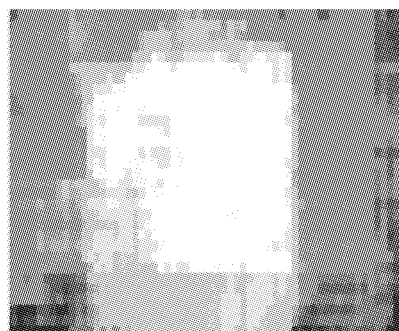


Fig. 14 Result of the multidirectional weight averaging morphological filtering algorithm in Ref. [4]

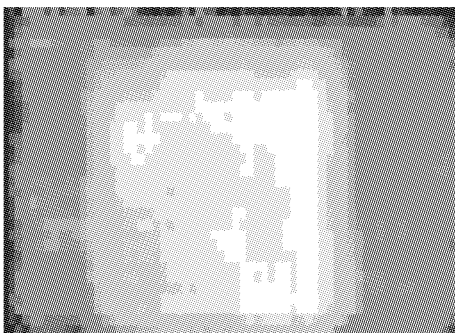


Fig. 15 Result processed by local statistics-homomorphic filter



Fig. 16 Result processed by wavelet soft thresholding algorithm

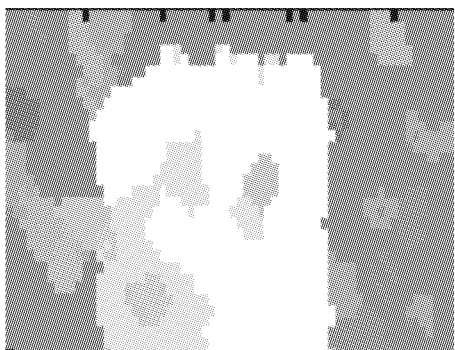


Fig. 17 Result filtered homomorphic mask-mean filter (two iteration)

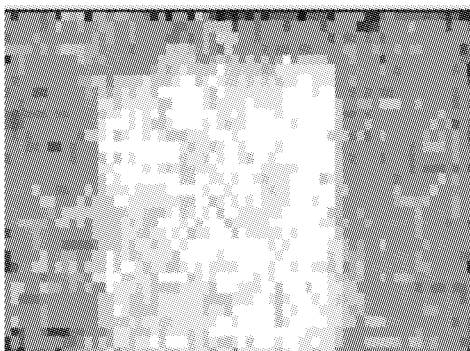


Fig. 18 Image filtered by using the algorithm of Homomorphic-fuzzy multilevel median filter (iterations)

根据上面几种滤波算法对脉冲相干激光雷达图

像的处理结果和散斑指数计算,结论是一致的,即本文的滤波算法和文献[4]的多方向加权均值形态滤波算法具有很好的图像边缘和几何结构的保持效果,较强的散斑噪声抑制能力。

Table 2 Speckle index about laser radar imagery (1.8 km) and processed image

Laser radar imagery (2.6 km) and algorithm	Speckle index
Laser radar imagery (1.8 km)	0.3488
Lee' local statistics filter	0.0942
Multidirectional weight averaging morphological filtering algorithm	0.0938
The filtering algorithm in this paper	0.0984
Wavelet soft-thresholding algorithm	0.1322
Homomorphic mask-mean filter (two iteration)	0.1269
Homomorphic-fuzzy multilevel median filter (two iterations)	0.1725

**结论** 本文提出了一种新的非线性加权均值多方向形态滤波算法,并且应用到脉冲相干激光雷达图像的散斑噪声抑制,取得了较好的效果,既保持了图像的边缘,又有效地抑制了散斑噪声,也就是说它集中了小波阈值算法的保持边缘好和局部统计滤波散斑噪声抑制能力强的优点。同时形态滤波的基本操作易于超大规模集成电路实现,易于实现图像的实时处理。因此非线性加权均值多方向形态滤波算法是优选的激光雷达图像的处理方法。

### 参 考 文 献

- 1 Goodman J W. Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc.*, 1976, **66**(11):1145~1150
- 2 Jiang Lihui, Li Ning, Cheng Xiangyang *et al.*. Speckle suppressing based on a new homomorphic filtering algorithm. *Laser and Infrared* (激光与红外), 2000, **30**(1):11~14 (in Chinese)
- 3 Wang Qi, Jiang Lihui, Li Ning *et al.*. Based on combining homomorphic and adaptive fuzzy multilevel median filtering for restoration of images degraded by speckle noise. *Chinese J. Laser* (中国激光), 2001, **28**(7):655~657 (in Chinese)
- 4 Jiang Lihui, Wang Qi, Wang Chunhui *et al.*. A speckle imaging model for impulse coherent laser radar and suppressing its speckle noise. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(12):1623~1628 (in Chinese)
- 5 Jiang Lihui, Wang Chunhui, Wang Qi *et al.*. Speckle noise suppressing based on a generalized parallel weighted-average morphological filtering algorithm. *Chinese J. Laser* (B), 2000 **9**(2):182~186
- 6 Zhao Chunhui, Sun ShengHe, Qiao JingLu. A generalized morphological filter based on adaptive weighted average. *Chinese J. Electronics*, 1997, **6**(3):76~81

- 7 Letalick D, Renhorn I, Steinvall O. Measured signal amplitude distributions for a coherent FM-CW CO<sub>2</sub> laser radar. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(21):3927~3938
- 8 Donoho D L. De-noising by  $\lambda$ -thresholding. *IEEE Trans. on Information Technology*, 1995, **41**(3):613~627
- 9 Lee J S. Speckle analysis and smoothing of SAR images. *Opt. Engng.*, 1986, **26**(5):636~643
- 10 Dewaelc P, Wambacq P, Oosterlinck A. Comparison of some speckle reduction techniques for SAR images. IGRASS'90, Maryland USA; the University of Maryland College Park, 2417~2422

## Algorithm about Suppressing Speckle Noise in Coherent Laser Radar Imagery

Jiang Lihui<sup>1,2</sup> Zhao Chunhui<sup>2</sup> Wang Qi<sup>3</sup>

- |   |  |
|---|--|
| } | 1 <i>Department of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001</i>       |
|   | 2 <i>Department of Information and Communication Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300</i> |
|   | 3 <i>National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001</i>          |

(Received 27 May 2002)

**Abstract:** A new nonlinear weighted average multidirectional morphological filtering algorithm is proposed, which is used in suppressing speckle noise. The algorithm, other algorithm proposed by us, wavelet soft thresholding algorithm and Lee's filter are applied for suppressing speckle noise in the Impulse Coherent Laser Radar Images, and their results are compared. The conclusion proved the improvement of the proposed algorithm in suppressing speckle noise under the condition of preserving edges of the image.

**Key words:** speckle noise suppressing; morphological filters; coherent laser radar; nonlinear weight; imagery