

激光雷达主动偏振图像散斑抑制算法

闻东海,江月松,华厚强,余 荣,张彦仲

(北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191)

摘要: 针对激光主动偏振图像的散斑去除问题,提出了一种基于异向扩散的冲击各向异性滤波模型。该模型融合了冲击滤波器和小核值相似区算法,利用小核值相似区算法提取偏振图像边缘,减少了噪声对边缘检测的影响;针对不同的图像区域,自动调整冲击滤波器的系数,使得该算法既能保持图像边缘,又可以很好地抑制图像的散斑。使用八方向一阶差分估计小核值相似区算法的门限,门限估计更加准确;迭代终止条件采用完全散射区域的平均绝对误差作为标准,使得迭代次数更加合理。通过对比等效视数和边缘保持指数可见,冲击各向异性滤波算法的散斑抑制能力和边缘保持能力与传统的 Lee 和 SRAD 模型相比更加有效。

关键词: 主动偏振成像; 冲击各向异性去噪; 冲击滤波; 散斑抑制

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1130-05

Algorithm for speckle reduction of laser radar polarization active image

Wen Donghai, Jiang Yuesong, Hua Houqiang, Yu Rong, Zhang Yanzhong

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to reduce speckle noise of laser active polarization image, a shock anisotropic denoising model was proposed. The model utilized Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus (SUSAN) algorithm to extract image edge which reduced the noise influence on edge detection influence. The approach adjusted coefficient of the shock filter automatically, which made new algorithm both retain the image edge, and restrain image speckle. The threshold of SUSAN was estimated by eight direction order difference, which made the estimation more accuracy. Fully developed regional average absolute error was used as the standard of iterative termination conditions. Through comparing the equivalent numbers of looks (ENL) and edge preserve index (EPI), the proposed algorithm provides more effective speckle reduction as well as edge preservation.

Key words: polarization active imager; shock anisotropic diffusion; shock filter; speckle reduction

收稿日期:2013-08-11; 修订日期:2013-09-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB707001)

作者简介:闻东海(1982-),男,博士,主要从事激光主动偏振成像散斑去噪研究。Email:dh_w10@163.com

0 引言

传统激光成像一般采用光强法,目标和背景的偏振特性往往被忽略,对于具有相同反射率的目标和背景,通过强度成像不能正确发现目标。激光主动偏振成像技术通过对物体进行偏振度成像,可以区分具有相同反射率的目标和背景,因而日益受到重视。该技术尤其在军事侦查、植被遥感和气溶胶探测方面已经体现出了极大的优势。但是散斑噪声的存在对偏振图像的后续使用造成了极大的干扰,所以散斑的去除对激光主动偏振成像具有重要意义。

1 散斑去噪算法概述

图像散斑的去除方法已经被很多著作进行了研究。大致包括自适应滤波器、小波法、偏微分方程法、全变差法。经典的自适应滤波器包括:Lee滤波器^[1]、Frost滤波器^[2]、Kuan滤波器^[3]。基于小波的去除散斑的方法可以分为阈值法^[4-5]和贝叶斯估计法^[6-7]。阈值法包括硬阈值、软阈值,其将小于指定阈值的小波系数视为噪声去除。贝叶斯估计法通过无噪信号和噪声的概率分布来估计无噪信号。偏微分方程法^[8]通过求解扩散方程实现图像去噪。全变差法^[9-10]去除散斑噪声,需要确定乘性噪声的概率分布。

自适应滤波法根据图像的局部统计特征来选取滤波窗口的大小和形状,尽管在保留图像细节方面取得了一定效果,但对窗口的选择很敏感,限制了处理效果。小波去除散斑噪声,阈值门限的设计尚无确定方法。全变差法在去除散斑的同时,存在降低图像边缘的锐度,在光滑区域出现“阶梯效应”的缺点。偏微分方程法通过求解初始值为输入图像的非线性热扩散方程来实现散斑去噪。但是现有的偏微分方程法存在的缺点包括:采用梯度提取图像的边缘信息,信息的提取受噪声影响较大;偏微分方程在扩散的同时,模糊了图像的边缘信息。

针对偏微分方程法的缺点,提出了一种抑制激光主动偏振图像散斑噪声的冲击各向异性算法。该算法利用小核值相似区算法提取图像的边缘信息,利用冲击滤波器增强图像的边缘信息。从理论上证明了算法的有效性,并通过对实际偏振图像的处理证明了该算法不仅能够有效去除散斑,而且能够保

持图像边缘。

2 理论分析

2.1 冲击滤波器

冲击滤波器(shock filter)其表达式为:

$$\frac{\partial I(x,y;t)}{\partial t} = -\text{sign}(I_{\eta\eta}) \cdot |\nabla I(x,y;t)| \quad (1)$$

式中: $I(\Omega,t) \rightarrow R, \Omega \in R, t$ 为时间常数; $I_{\eta\eta}$ 为图像梯度方向二阶偏导数; ∇ 为图像梯度算子; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数; $|\cdot|$ 为绝对值算子; $\frac{\partial}{\partial t}(\cdot)$ 为偏导函数。图像像素点在作用区域取得极大值时,梯度二阶偏导数 $I_{\eta\eta}$ 为负,则公式(1)为:

$$I_t = |\nabla I| \quad (2)$$

式中: I_t 为图像在时刻 t 的偏导数,表示使用半径为 t 的圆形结构元素对图像进行的膨胀运算。图像像素点在作用区域取得极小值时, $I_{\eta\eta}$ 为正,则公式(1)为:

$$I_t = -|\nabla I| \quad (3)$$

公式(3)为使用半径为 t 的圆形结构元素对图像进行腐蚀运算。通过以上分析可知,冲击滤波器可以增强图像的边缘。通过处理模糊的阶跃信号,冲击滤波器的处理效果如图1所示。

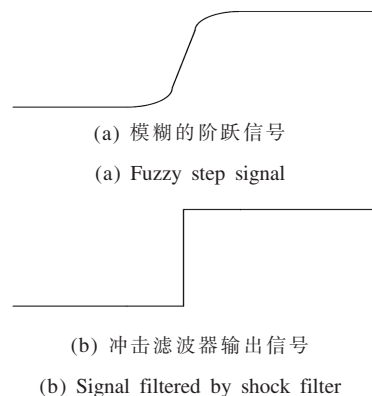


图1 冲击滤波器效果图

Fig.1 Sketches of shock filter

2.2 小核值相似区算法

小核值相似区算法(SUSAN)的基本原理是把图像中的每个像素与具有相近灰度值的局部区域相联系。

SUSAN算法用一个圆形模板遍历图像,若模板内其他任意像素的灰度值与模板中心像素(核)的灰度值的差小于一定阈值,就认为该点与核具有相同

(或相近)的灰度值,满足这样条件的像素组成的区域称为核值相似区(USAN)。假设输入图像为 I ,最简单的 USAN 具有下列形式:

$$d(\vec{r}, \vec{r}_0) = \begin{cases} 1, & |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| \leq T \\ 0, & |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| > T \end{cases} \quad (4)$$

式中: \vec{r}_0, \vec{r} 分别代表中心像素的位置和模板中其他像素的位置; $I(\vec{r})$ 为位置 \vec{r} 处像素点强度值; $d(\cdot)$ 为核值相似区; T 为灰度差门限,它影响检测到角点的个数。 T 减小,获得图像中更多精细的变化,从而给出相对较多的检测数量。门限 T 必须根据图像的对比度和噪声等因素确定。则图像中某一点的 USAN 区域大小可由下式表示:

$$v(\vec{r}_0) = \sum_{\vec{r} \neq \vec{r}_0} d(\vec{r}, \vec{r}_0) \quad (5)$$

式中: $v(\vec{r}_0)$ 为点 r_0 核值相似区和函数。

USAN 区域包含了图像局部许多重要的结构信息,它的大小反映了图像局部特征的强度,当模板完全处于背景或目标中时,USAN 区域最大,当模板移向目标边缘时,USAN 区域逐渐变小,当模板中心处于角点位置时,USAN 区域很小。得到每个像素对应的 USAN 区域大小后,利用下式产生初始角点响应:

$$ER(\vec{r}_0) = \begin{cases} p - v(\vec{r}_0) & v(\vec{r}_0) < p \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: p 为几何门限, $p = 3q_{\max}/4$, q_{\max} 为 q 的最大值; $ER(\vec{r}_0)$ 为初始角点响应函数。由于 SUSAN 算法不依赖于任何梯度信息,所以显著地减少了噪声对边缘检测的影响。

3 冲击各向异性滤波模型

提出一种冲击各向异性去噪模型,将 SRAD 模型和冲击滤波模型中的梯度算子替换为 SUSAN 算子,并将 SRAD 模型与冲击滤波算子模型相融合,针对不同区域,自适应调整滤波模型。在图像均匀区域,主要发挥 SRAD 模型的作用,使得散斑得到充分抑制;而在图像边缘区域,则主要发挥冲击滤波器的作用,使得图像的边缘得到增强。该滤波模型

表达式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial I(x,y;t)}{\partial t} = \alpha \operatorname{div}[(q(x,y;t)] \cdot \nabla I(x,y;t) \\ -\beta(1-g) \operatorname{sign}(I_{\eta\eta}) \cdot \operatorname{SUSAN}(I) \\ I(x,y;0) = I_0(x,y) \\ (\partial I(x,y;t)/\partial n)_{n=0} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中,

$$q(x,y;t) = \sqrt{\frac{(1/2)(|SUSAN(I)|/I)^2}{[1+(1/4)(\nabla^2 I/I)]^2} - \frac{\sqrt{-(1/4^2)(\nabla^2 I/I)^2}}{[1+(1/4)(\nabla^2 I/I)]^2}} \quad (8)$$

$$g = \exp\left(-\left(\frac{SUSAN(I)}{k}\right)^2\right) \quad (9)$$

公式(7)中, $\operatorname{div}(\cdot)$ 为散度算子; α, β 为经验常数; k 为实验常数。公式(8)中 $\nabla^2(\cdot)$ 为拉普拉斯算子。

3.1 模型分析

引入局部坐标系 (η, ε) , 其中 η 表示图像单位梯度矢量, ε 表示图像水平线的单位切矢量。如图 2 所示。

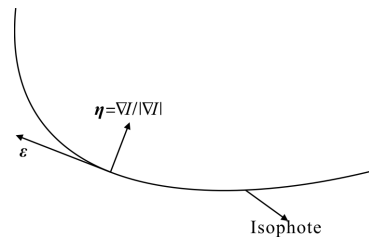


图 2 局部坐标系

Fig.2 Local coordinate

$I_{\eta\eta}$ 和 $I_{\varepsilon\varepsilon}$ 分别为 η 和 ε 方向的二阶方向导数,则公式(7)可表达为:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = c(q) \left\{ \left[\frac{1-q^2/q_0^4(t)}{1+q^2/q_0^4(t)} \right] I_{\eta\eta} + I_{\varepsilon\varepsilon} \right\} - (1-g) \operatorname{sign}(I_{\eta\eta}) \cdot |SUSAN(I)| \quad (10)$$

式中: $q_0(t)$ 为散斑尺度函数。在边缘处, $q_0(t) \leq 1, q \gg$

$q_0(t), 1-g \approx 1, \frac{1-q^2/q_0^4(t)}{1+q^2/q_0^4(t)} \approx -1$, 所以冲击各向异性

滤波模型在边缘处可以实现图像边缘增强;在平坦区域, $1-g \approx 1$, 冲击滤波器作用较小,主要发挥模型的抑制散斑能力。

3.2 小核值相似区算子参数估计

SUSAN 边缘检测算子的门限 T 对于正确检测图像边缘具有重要作用。若 T 过小, 则可能将散斑引起的噪声误认为图像边缘; 若 T 过大, 则可能忽略图像细节。即 T 应该反映给定主动偏振图像散斑噪声的变化。文中选用偏振图像的完全散射区域估计 T 。对于区域中的每个点, 从八个方向计算强度变化, 即:

$$\begin{cases} \nabla_N=I_{i-1,j}-I_{i,j}; \nabla_S=I_{i+1,j}-I_{i,j} \\ \nabla_W=I_{i,j-1}-I_{i,j}; \nabla_E=I_{i,j+1}-I_{i,j} \\ \nabla_{NW}=I_{i-1,j-1}-I_{i,j}; \nabla_{NE}=I_{i-1,j+1}-I_{i,j} \\ \nabla_{SE}=I_{i+1,j+1}-I_{i,j}; \nabla_{SW}=I_{i+1,j-1}-I_{i,j} \end{cases} \quad (11)$$

通过对八个方向的平均来计算当前像素点强度的变化值, 即

$$IR(i,j)=0.125 \times \text{sqr}t(\nabla_N^2+\nabla_S^2+\nabla_W^2+\nabla_E^2+\nabla_{SE}^2+\nabla_{SW}^2+\nabla_{NE}^2+\nabla_{NW}^2) \quad (12)$$

式中: $\text{sqr}t(\cdot)$ 为平方差函数; $IR(\cdot)$ 为像素强度变化函数。 T 值估计由下式计算:

$$T=\text{Median}_{(i,j)}(IR(i,j)) \quad (13)$$

式中: $\text{Median}(\cdot)$ 为中值函数。

3.3 模型迭代终止条件

若采用固定迭代步数来处理图片, 可能会产生散斑过度滤波或者散斑抑制不充分。为了更好地实现散斑抑制, 采用平均绝对误差标准(MAE)作为迭代终止标准。随着迭代次数的增加, 平均误差值以指数方式递减。当平均迭代误差足够小时, 表明两次迭代的差别已经足够小, 迭代应当终止。应用 MAE 标准作为偏振图像迭代终止标准是合适的。

采用两幅连续迭代图像的完全散射区域的平均绝对误差作为迭代终止条件。其表达式为:

$$MAE(FDI)=\frac{1}{m \times n} \sum_{m=1}^m \sum_{j=1}^n \sqrt{(FDI_{i,j}^t-FDI_{i,j}^{t-1})^2} \quad (14)$$

式中: $FDI_{i,j}^t$ 、 $FDI_{i,j}^{t-1}$ 分别为完全散射区域中像素点 (i,j) 在时刻 t 和时刻 $t-1$ 的滤波值; m 和 n 分别为完全散射区域图像的行数和列数。

3.4 模型的算法流程

考虑图像 $I(x,y)$, 时间步长为 Δt , 空间变量 x 与 y 的步长均为 h , 空间和时间坐标按如下方式进行量化:

$$\begin{aligned} t=l\Delta t, l=1,2,\dots \quad x=ih, i=1,2,\dots M \\ y=jh, j=1,2,\dots N \end{aligned} \quad (15)$$

式中: 设置 h 为 1, M 和 N 分别为图像的行数和列数。

公式(7)右端第一项的离散化格式为:

$$\begin{aligned} d_{i,j}^n=c_{i+1,j}^n(I_{i+1,j}^n-I_{i,j}^n)+c_{i,j}^n(I_{i-1}^n-I_{i,j}^n)+ \\ c_{i,j+1}^n(I_{i,j+1}^n-I_{i,j}^n)+c_{i,j}^n(I_{i,j-1}^n-I_{i,j}^n) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $c_{i+1,j}^n$ 、 $c_{i,j}^n$ 、 $c_{i,j+1}^n$ 、 $c_{i,j}^n$ 为扩散系数。公式(7)右端第二项采用单边迎风差分方案格式进行离散化, 则公式(7)最终的离散化方案为:

$$I_{i,j}^{n+1}=I_{i,j}^n+\Delta t(\partial d_{i,j}^n+\beta(1-g)t_{i,j}^n) \quad (17)$$

冲击各向异性模型的计算步骤为:

步骤 1: 输入初始含噪图像 I_0 , 给定初始化参数, 时间间隔 Δt , 迭代终止参数。

步骤 2: 按公式(7)进行迭代运算。

步骤 3: 判断是否达到终止条件, 否则继续执行步骤 2。

4 偏振图片散斑抑制效果分析

为了客观评价滤波模型的去噪效果, 采用等效视数(ENL)和边缘保持指数(EPI)两个指标对处理结果进行评价。将冲击各向异性模型与 Lee 模型、SRAD 模型、Non-Local Means (NLM)滤波法进行比较。取 $\alpha=0.4$, $\beta=0.6$, $k=180$, 迭代终止条件 $\sigma=1e-3$ 。表 1 为滤波器参数设置表。表 2 为不同滤波模型等效视数和边缘增强指数对比表。图 3 为偏振飞机图片处理结果。

表 1 滤波器参数设置表

Tab.1 Filter parameters

Filter	Iteration number	Smoothing parameter	Threshold	Patch size
Lee	-	-	-	3×3
SRAD	10	0.08	-	-
NLM	-	8	0.6	9×9

表 2 滤波器性能对比表

Tab.2 Comparison of performance for filters

Filter	ENL	EPI
Lee	26.527 3	0.715 9
SRAD	28.729 1	0.690 5
NLM	27.927 1	0.710 6
Presented model	29.273 4	0.723 6

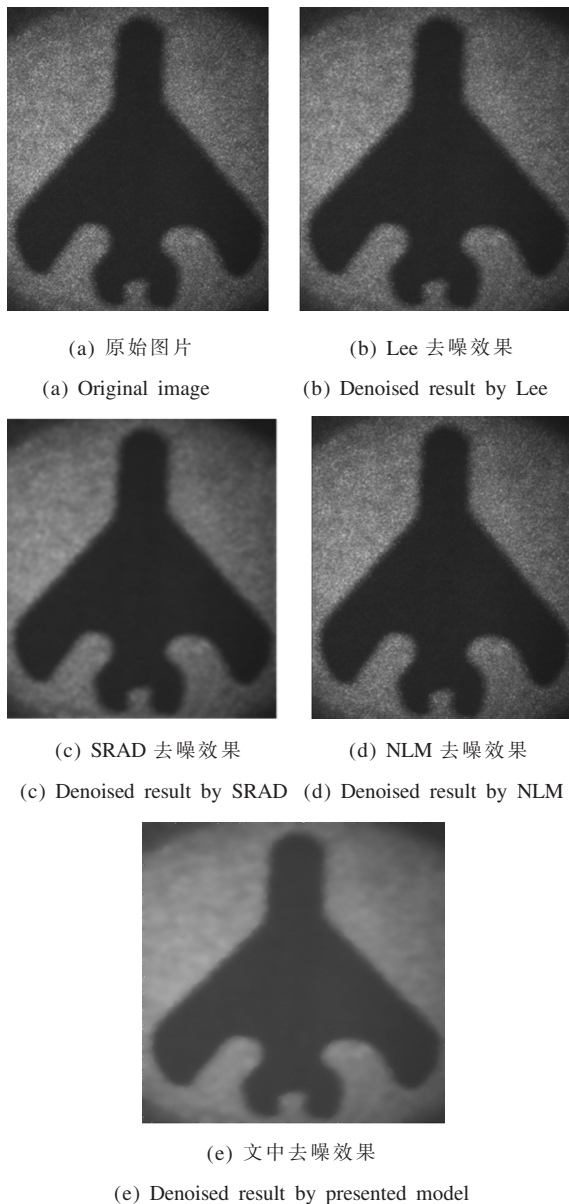


图 3 偏振飞机图像去噪结果

Fig.3 Denoised results of polarization plane image

5 结束语

提出了冲击各向异性滤波模型用以处理激光主动成像图片。该算法在偏振图像处理中实现选择性平滑,并针对图像边缘进行了加强。处理结果表明,该算法在抑制散斑噪声的同时,较好地保留了图像的边缘信息。

参考文献:

[1] Li Ziqin, Wang Qi, Li Qi, et al. Comparison of algorithms for suppressing speckle in laser imaging system [J]. *Infrared*

and Laser Engineering, 2003, 32(2): 130-133. (in Chinese)

李自勤, 王琪, 李琦, 等. 激光成像系统图像散斑抑制算法比较[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(2): 130-133.

[2] Zhang Zhaohui, Pan Chunhong, Ma Songde. SAR image de-speckling based on modified frost filter[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(4): 431-435. (in Chinese)

张朝晖, 潘春洪, 马颂德. 一种基于修正 Frost 核的 SAR 图像斑点噪声抑制方法[J]. *中国图象图形学报*, 2005, 10(4): 431-435.

[3] Darain T Kuan, Sawchuk Alexander A, Strand Timothy C, et al. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1985, 7(2): 165-177.

[4] 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*, 2011, 40(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*, 2011, 40(2): 332-337.

[5] Liu Zhigang, Guo Yanying. Denoised algorithm based on wavelet-edge preserved kalman filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 638-641. (in Chinese)

刘志刚, 郭艳颖. 基于小波-边缘保持 Kalman 滤波抑制散斑噪声算法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S2): 638-641.

[6] Achim A, Bezerianos A, Tsakalides P. Novel bayesian multiscale method for speckle removal in medical ultrasound images[J]. *Medical Imaging*, 2001, 20(8): 772-783.

[7] Foucher S, B Benie G, Boucher J M. Multiscale MAP filtering of SAR images [J]. *Image Processing*, 2001, 10(1): 49-60.

[8] Qian Weixian, Chen Qian, Gu Guohua, et al. Diffusion denoising algorithm for infrared image based on direction information measure and time-domain iterative technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 561-565. (in Chinese)

钱惟贤, 陈钱, 顾国华, 等. 采用方向信息测度和时间域迭代技术的红外图像扩散去噪算法[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 561-565.

[9] Sangwoon Y, Hyenkyun W. A new multiplicative denoising variational model based on mth Root transformation [J]. *Image Processing*, 2012, 21(5): 2523-2533.

[10] Hyenkyun W, Sangwoon Y. Alternating minimization algorithm for speckle reduction with a shifting technique[J]. *Image Processing*, 2012, 21(4): 1701-1714.