

激光偏振成像散斑统计特性和抑制方法研究

闻东海 江月松 张绪国 张彦仲 华厚强

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要 对激光偏振成像系统的散斑统计特性及其相应的散斑去除方法进行了理论和实验研究。运用穆勒矩阵法建立了该激光偏振成像系统散斑光强的概率分布模型。针对现代电荷耦合器件(CCD)的成像特点,通过比较散斑与像素的大小,将散斑分为两种情况进行研究,即小散斑和大散斑。得出散斑的归一化方差与像素成线性关系,均值不受像素的影响。进而提出了统一的散斑噪声概率模型,即改进的伽马分布模型。基于此模型,提出了改进的贝叶斯非局部滤波模型。通过处理真实的偏振图片,综合等效视数、边缘增强指数等指标,表明该算法比传统的散斑去除算法具有更好的散斑去除和边缘保持能力。

关键词 统计光学;散斑概率分布模型;穆勒矩阵法;散斑;非局部算法

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0311003

Speckle Characteristics of Laser Radar Polarization Imaging and Despecking Algorithm

Wen Donghai Jiang Yuesong Zhang Xuguo Zhang Yanzhong Hua Houqiang

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

Abstract The theoretical and the experimental investigations of the laser polarization imaging system of speckle statistical characteristics and speckle removing method are conducted. A probability distribution model for speckle intensity of laser active polarization imaging system by using Müller matrix is proposed. According to modern charge coupled device (CCD) imaging characteristics, through comparison of speckle and pixel size speckles are divided into two kinds, namely small speckle and big speckle. The normalized variance of speckle is linear to pixel, and the mean value of speckle is irrelevant to pixel. A unified speckle noise probability model, namely the improved Gamma distribution model is proposed. Based on this model, the improved Bayesian nonlocal algorithm is presented. The despeckling results show that equivalent number of looks and edge preserve index outperform those of traditional methods.

Key words statistical optical; probability distribution model of speckle; Müller matrix method; speckle; nonlocal algorithm

OCIS codes 030.1640; 030.6140; 030.6600; 070.4340

1 引言

激光偏振成像技术在军事和民事领域都有广泛的应用,但在其成像过程中会产生散斑噪声,严重影响偏振图像信息的提取。因此,研究散斑的统计特性对于抑制散斑噪声具有十分重要的意义。国内外学者对散斑统计特性进行了广泛的研究,在医用方

面,超声波的散斑统计模型和逆高斯散斑统计模型相继提出并展开了研究^[1,2]。在合成孔径雷达成像方面,学者提出了很多不同的模型,如反高斯分布模型^[3]、重尾瑞利模型^[4]和二阶混合高斯分布模型^[5]。戴恩文等^[6]研究了菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达的散斑特性。其他方面,双波长散斑场空间相

收稿日期: 2012-09-12; **收到修改稿日期**: 2012-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(41140035)、国家 973 计划(2011CB707001)和国家 863 计划(2012AA8126029B)资助课题。

作者简介: 闻东海(1982—),男,博士研究生,主要从事偏振成像方面的研究。E-mail: dh_wl10@163.com

导师简介: 江月松(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事物理电子学方面的研究。E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

关参数及在两单波长散斑图像中样本子区与目标子区的位置关系得到了研究^[7]。

现代的感光器件,如电荷耦合器件(CCD),包含数百万个探测器,可以对不同区域的散斑强度进行并行处理。但关于像素对散斑的影响和偏振成像系统的散斑特性没有进行深入研究,例如,Skopetrov等^[8]只是分析了简易偏振成像系统的散斑特性,没有对激光偏振成像系统进行深入研究。

针对一种改进的激光偏振成像实验方法,研究了散斑噪声的对比度、方差、相关函数以及散斑归一化方差与像素的函数关系,并根据这些参量设计了针对性较强的散斑抑制算法,证实了算法的有效性。

2 双旋转波片一次测量偏振成像系统

改进偏振成像系统由激光器、发射系统、接收系统和成像及信号处理系统组成。该系统通过一次测量即可求得目标的偏振度,从而得到目标偏振度编码的图像。激光雷达偏振遥感成像系统在发射系统中加入偏振状态产生部分——偏振态发生器,在接收系统中加入偏振状态检测部分——偏振态分析仪,利用偏振分光棱镜代替偏振态分析仪中的偏振片,利用两个 CCD 相机同时接收偏振状态相互垂直的目标像。实验装置原理图如图 1 所示。

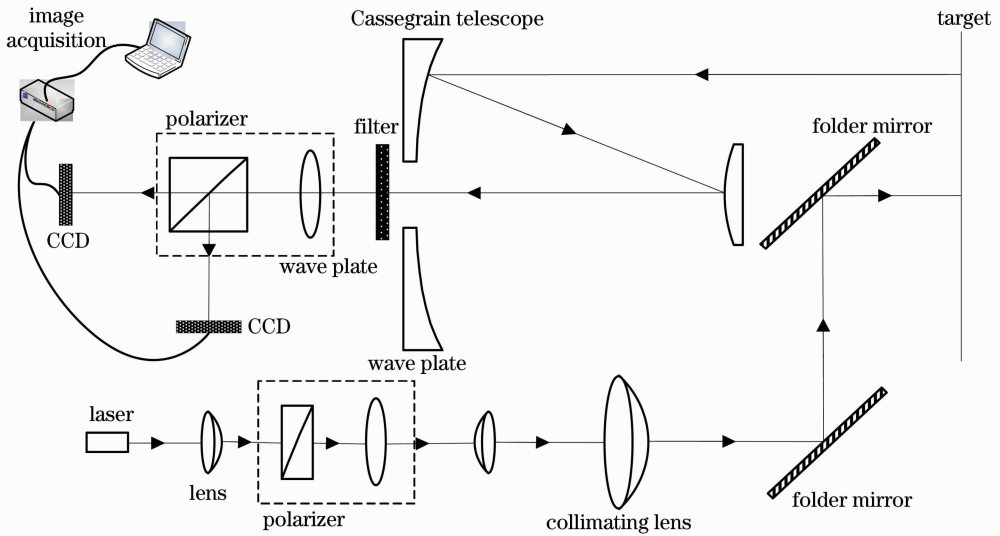


图 1 双旋转波片激光偏振成像系统

Fig. 1 Laser polarization imaging system with double rotating wave plate

激光器发射稳定的 808 nm 激光束进入偏振态发生器。该偏振态发生器由准直透镜、偏振片、 $\lambda/8$ 波片、扩束透镜组成。偏振片和 $\lambda/8$ 波片都设定在一定的角度,其作用是产生特定的入射光斯托克斯矢量。光束经过两次镜面反射照射目标,通过卡塞格林望远镜收集反射光。光束进入偏振态分析仪。该分析仪由 $\lambda/8$ 波片、偏振分光棱镜组成。 $\lambda/8$ 波片和偏振分光棱镜都放置在特定的角度,其作用是产生特定的穆勒矩阵,进而产生特定的出射光斯托克斯矢量,得到目标的偏振信息。数据采集接收系统由双通道的 CCD 及计算机构成。通过系统中各个元件的配置和调节,使得该系统能够获取目标后向散射光的偏振度。

在该系统中,偏振态发生器中起偏器透光轴和 X 轴的夹角为 -72.385° 、波片快轴与 X 轴夹角为

45° ,因此,偏振态发生器的穆勒矩阵为

$$M_{PSG} = \begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{2}/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} & 0 \\ -1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/3 & 1/3 & 0 \\ -1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/3 & 1/3 & 0 \\ -1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/3 & 1/3 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

则入射光的斯托克斯矢量为

$$S_{\text{intra}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当目标不是双折射材料时,目标后向散射光的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{outtar}} = \begin{bmatrix} M_{00} \\ -M_{11}/\sqrt{3} \\ -M_{11}/\sqrt{3} \\ -M_{33}/\sqrt{3} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 M_{00}, M_{11}, M_{33} 分别为目标穆勒矩阵的主对角线元素。

偏振态分析仪中起偏器透光轴和 X 轴夹角为 -72.85° 、波片慢轴与 X 轴的夹角为 45° 。通过偏振棱镜得到两束偏振态相互垂直的偏振光,则两个 CCD 上探测到的水平和垂直光强分别为

$$I_{//} = M_{00} + \frac{1}{3}(2M_{11} + M_{33}), \quad (4)$$

$$I_{\perp} = M_{00} - \frac{1}{3}(2M_{11} + M_{33}). \quad (5)$$

根据偏振度定义,可知

$$p_d = \frac{|M_{11}| + |M_{22}| + |M_{33}|}{3M_{00}}, \quad (6)$$

式中 p_d 为偏振度, $M_{11} \approx M_{22}$, 因此偏振度可以近似为

$$p_d = \frac{2|M_{11}| + |M_{33}|}{3M_{00}} = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{//} + I_{\perp}}. \quad (7)$$

按照(7)式对得到的图像进行偏振度编码就可以实现激光偏振成像,得到目标的偏振度图像。

3 偏振图像散斑特性研究

透过偏振态分析仪的水平和垂直光强 I 服从负指数分布,即 $P(I) = (1/\bar{I})\exp(-I/\bar{I})$, 式中 \bar{I} 为 I 的均值。则 CCD 的一个像素上得到的光强可以表示为

$$I_a = \frac{1}{A_D} \iint_{\text{pixel}_a} I(x, y) dx dy. \quad (8)$$

式中 A_D 为一个像素的面积。 $\alpha = 1, \dots, N$ 为相机的不同像素。光强 I 的均值 i 和方差 c 的估计为

$$i = \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N I_a, \quad (9)$$

$$c = \frac{1}{N-1} \sum_{\alpha=1}^N (I_a - i)^2. \quad (10)$$

由(9)、(10)式可知,均值和方差的估计为无偏估计,因此

$$\langle i \rangle = \langle I \rangle, \quad (11)$$

$$\langle c \rangle = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle = \langle I^2 \rangle. \quad (12)$$

(11)、(12)式中 $\langle \dots \rangle$ 表示均值。针对实验材料的不同,散斑大小各有不同。根据散斑尺寸 b 和像素大小 a 之间的关系,可以分两种情况考虑散斑的特性。一

种为小散斑情况 ($b < a$), 这种情况下,不同像素之间不相关,但是其强度概率分布不服从负指数分布。第二种情况为大散斑情况 ($b \geq a$), 光强分布仍为负指数分布,但是不同像素之间是相关的。

3.1 小散斑偏振图像特性研究

在小散斑情况下,不同像素的积分光强相互独立,像素积分光强服从伽马分布:

$$P(I_a) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \left(\frac{\mu}{I}\right)^\mu I_a^{\mu-1} \exp\left(-\frac{\mu I_a}{I}\right). \quad (13)$$

式中参数 μ 为自相关系数, $\mu \geq 1$, 且依赖于像素的大小和形状。

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{a^4} \int_{\text{pixel}} d^2 r \int_{\text{pixel}} [g(r-r') - 1] d^2 r'. \quad (14)$$

式中 $d^2 r$ 代表二维积分, $g(\Delta r)$ 为散斑强度空间自相关函数。通过计算可知

$$\langle I_a^2 \rangle = \frac{\mu + 1}{\mu} \langle I \rangle^2. \quad (15)$$

则

$$\langle i \rangle = \langle I \rangle, \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_i^2}{\langle i \rangle^2} = \frac{1}{\mu N}, \quad (17)$$

$$\langle c \rangle = \frac{\langle I \rangle^2}{\mu}, \quad (18)$$

$$\frac{\sigma_c^2}{\langle c \rangle^2} = \frac{2}{N-1} \left[1 + \frac{3}{\mu} \left(1 - \frac{1}{N} \right) \right]. \quad (19)$$

式中 σ_i^2 和 σ_c^2 分别为 i 和 c 的方差,由(19)式可知,当 $N \rightarrow \infty$ 时,可得

$$\frac{\sigma_c^2}{\langle c \rangle^2} \Big|_{N \rightarrow \infty} = \frac{2}{N} \left(1 + \frac{3}{\mu} \right). \quad (20)$$

3.2 大散斑偏振图像特性研究

在大散斑情况下,由于光强服从负指数分布,故偏振图像仍服从负指数分布,但需要考虑相邻像素的相关关系如图 2 所示。

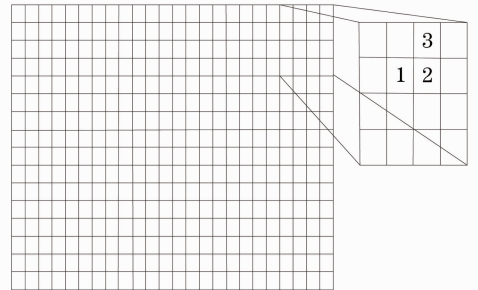


图 2 相邻像素的相关关系

Fig. 2 Correlation relation of adjacent pixels

相关关系对光强和方差的影响可以通过增加两个参数进行描述:

$$\frac{1}{\mu_2} = \frac{1}{a^4} \int_{\text{pixel 1}} d^2 r \int_{\text{pixel 2}} [g(r-r') - 1] d^2 r', \quad (21)$$

$$\frac{1}{\mu_3} = \frac{1}{a^4} \int_{\text{pixel 1}} d^2 r \int_{\text{pixel 3}} [g(r-r') - 1] d^2 r', \quad (22)$$

式中 μ_2 为像素 1 和 2 之间的互相关系数, μ_3 为像素 1 和 3 之间的互相关系数。为了计算光强的方差, $\sigma_i^2 = \langle i^2 \rangle - \langle i \rangle^2$, 需要计算 $\langle i^2 \rangle$, 即

$$\langle i^2 \rangle = \frac{1}{N^2} \sum_{a=1}^N \sum_{a=1}^N \langle I_a I_a \rangle. \quad (23)$$

(23)式中的相关函数 $\langle I_a I_a \rangle$ 可以分为三种情况进行计算, 第一种情况为图 2 中像素 1 的自相关函数, 即

$$\langle I^2 \rangle = \frac{1}{a^4} \int_{\text{pixel}} d^2 r \int_{\text{pixel}} \langle I(r) I(r') \rangle d^2 r' = \langle I \rangle^2 \left(1 + \frac{1}{\mu} \right). \quad (24)$$

第二种情况为图 2 中像素 1 和像素 2 的互相关函数, 即

$$\begin{aligned} \langle I_1 I_2 \rangle &= \frac{1}{a^4} \int_{\text{pixel 1}} d^2 r \int_{\text{pixel 2}} \langle I(r) I(r') \rangle d^2 r' = \\ &\langle I \rangle^2 \left(1 + \frac{1}{\mu_2} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

第三种情况为图 2 中像素 1 和像素 3 的互相关函数, 即

$$\begin{aligned} \langle I_1 I_3 \rangle &= \frac{1}{a^4} \int_{\text{pixel 1}} d^2 r \int_{\text{pixel 3}} \langle I(r) I(r') \rangle d^2 r' = \\ &\langle I \rangle^2 \left(1 + \frac{1}{\mu_3} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

(26) 式中包含了 N 个 $\langle I^2 \rangle$ 项, $4(N - \sqrt{N})$ 个 $\langle I_1 I_2 \rangle$ 项, $4(\sqrt{N} - 1)^2$ 个 $\langle I_1 I_3 \rangle$ 项, $N^2 - (3\sqrt{N} - 2)^2$ 个 $\langle I \rangle^2$ 项。即

$$\begin{aligned} \langle i^2 \rangle &= \frac{1}{N^2} \{ N \langle I^2 \rangle + 4(N - \sqrt{N}) \langle I_1 I_2 \rangle + \\ &4(\sqrt{N} - 1)^2 \langle I_1 I_3 \rangle + \langle N^2 - (3\sqrt{N} - 2)^2 \rangle \langle I \rangle^2 \}. \end{aligned} \quad (27)$$

使用(24)~(27)式以及 $\sigma_i^2 = \langle i^2 \rangle - \langle i \rangle^2$, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_i^2}{\langle i \rangle^2} &= \frac{1}{N} \left[\frac{1}{\mu} + \frac{4}{\mu_2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) + \right. \\ &\left. \frac{4}{\mu_3} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{N}} + \frac{1}{N} \right) \right]. \end{aligned} \quad (28)$$

为了计算 c 的均值, 可以将(10)式改写为

$$c = \frac{1}{N-1} \sum_{a=1}^N I_a^2 - \frac{i^2}{1-1/N}. \quad (29)$$

利用(24)式和(28)式, 可得

$$\langle c \rangle = \langle I \rangle^2 \left[\frac{1}{\mu} - \frac{4}{\mu_2 \sqrt{N}(\sqrt{N}+1)} - \frac{4(\sqrt{N}-1)}{\mu_3 N(\sqrt{N}+1)} \right]. \quad (30)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, (30)式变为(18)式。

为了计算 c 的方差, 可以利用(30)式进行计算, 但是, 计算十分繁琐复杂。可通过数值模拟产生散斑尺寸分别为 2、4 的 1024×1024 的两组散斑模型, 结合不同像素的大小, 产生合成散斑。当 $N \rightarrow \infty$ 时, 由(20)式可知, $\sigma_c^2 / \langle c \rangle^2$ 可以表示为 $1/\mu$ 项之和。数值模拟结果可以通过修改(20)式进行拟合, 即

$$\frac{\sigma_c^2}{\langle c \rangle^2} \approx \frac{2}{N} \left[1 + \frac{3}{\mu} + \frac{10}{\mu^2} \right]. \quad (31)$$

小散斑情况下, 散斑归一化方差与像素的函数关系如图 3 所示。

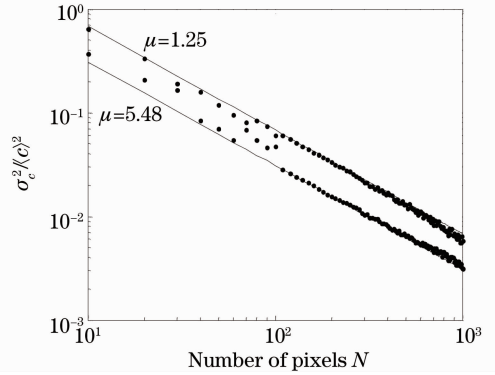


图 3 小散斑归一化方差与像素的函数关系

Fig. 3 Function relation between small speckle normalized variance and pixel

图 3 两条直线为(20)式在参数 μ 为 1.25 和 5.48 预测的理论值。圆点为照射在泡沫上, 曝光时间为 350 ms, 产生的散斑计算的实验值。由图 3 可知, 在像素值较大的情况下, 理论值与实际值拟合较好, 而在像素值较小的情况下, 理论值与实际值拟合较差。这是因为理论值为在像素趋于无穷情况下的预测值。由于采用相机的像素会达到百万级像素, 所以在实际应用中小散斑情况下得到的方差公式能够很好的进行理论估计。

大散斑情况下, 归一化方差与像素的函数关系如图 4 所示。

图 4 两条直线为(31)式在参数 μ 为 1.25 和 5.48 时的理论值。圆点为照射在金属上, 曝光时间为 15 ms 的实际值。在 $\mu = 5.48$ 的情况下, 当像素值较小的情况下, 理论值和实际值不能很好的吻合, 这是因为理论值是当像素值趋于无穷的情况下得到的, 所以在像素值较小的情况下, 理论值和实际值不能很好的吻合。一般的 CCD 相机像素会多达百万像素, 所以在实际情况下, 得到的理论值能够很好地满足实际应用。

小斑情况下, 均值波动与像素的函数关系如

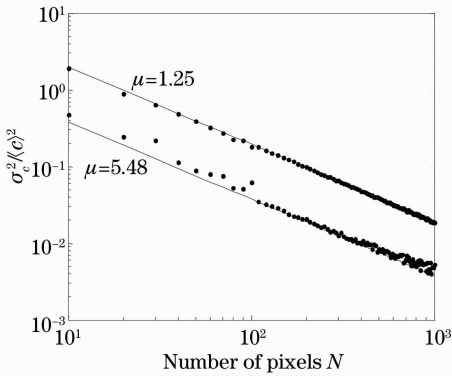


图4 大散斑归一化方差与像素的函数关系
Fig. 4 Function relation between big speckle normalized variance and pixel

图5所示。

图5为小散斑情况下,均值波动与像素的函数关系。4条线段分别为 μ 在4个不同取值时理论值与实验值的比较。直线为理论值,菱形为实验值。从图中可以看出,在像素值较小的情况下,理论值与实验值有一定偏差;在像素值较大的情况下,理论值预测实验值较准确。这是因为理论值是在像素值较大的情况下得到的,所以在像素值较小的情况下,理论值与实际值有些偏差。在实际的相机中,像素值会达到百万像素值,理论值能够很好地对其进行计算。

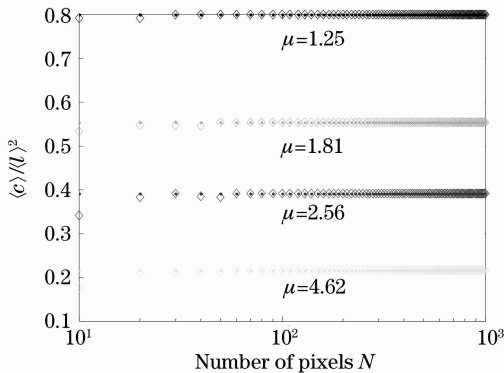


图5 大小散斑情况下归一化均值与像素函数关系
Fig. 5 Function relation between small speckle normalized mean and pixel

3.3 改进的伽马分布

根据以上分析,提出了偏振成像的统一散斑概率分布模型,即改进的伽马模型,即

$$P(I) = \frac{\Gamma(\mu + \mu_2 + \mu_3)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\mu_2)\Gamma(\mu_3)} \left(\frac{\mu + \mu_2 + \mu_3}{I} \right)^{\mu + \mu_2 + \mu_3} \times I^{\mu + \mu_2 + \mu_3 - 1} \exp \left[- \frac{(\mu + \mu_2 + \mu_3)I}{I} \right]. \quad (32)$$

(32)式在小散斑情况下,互相关系数 $\mu_2 = \mu_3 = 0$,转化为(13)式;在大散斑情况下,则考虑到像素之间的

相互关系对概率密度的影响,更准确地描述了散斑的概率分布模型。

4 改进的非局部偏振图像去噪算法

图像散斑的去除的方法已经被很多著作进行了研究。大致可以分为自适应滤波器^[9,10]、小波法^[11,12]、偏微分方程^[13,14]和混合方法^[15,16]。以上的各种散斑滤波器可以称为局部自适应复原算法^[17],局部自适应滤波器的缺点为散斑去除效果受滤波窗口大小和形状的影响;某些方法需要一个经验值确定的去噪门限。因此,自适应去除散斑噪声的一个发展趋势为设计自适应调整大小和方向的滤波窗口。应用小波方法去除散斑噪声,阈值门限的设计一般需要根据经验完成;层间的概率模型还需要重点研究。小波去除散斑成功与否,就在于得到散斑先验知识的能力和利用这些知识进行准确建模的能力,所以未来小波去除散斑方法的进一步发展,还有赖于新的更为准确的模型的提出。偏微分方程方法应用图像的梯度确定边缘信息,在散斑噪声较大的情况下,梯度不能准确定位图像的边缘信息,不能增强图像的细节和边缘部分。

最近,Buades等^[18]提出了非局部去噪,其利用像素点周围的窗口邻域来表示像素点的特征,然后基于邻域内灰度值向量之间的欧氏距离定义相应中心像素点之间的权值。Buades等将该算法应用于图像去噪,证明其性能要优于很多经典的去噪算法,如双边滤波、各向异性扩散、全变差滤波以及基于小波变换的方法等。根据偏振成像系统的散斑理论模型,提出了针对性强的偏振成像散斑抑制算法,即基于模糊域自适应非局部偏振图像去噪算法。该算法根据散斑噪声的统一概率分布模型,提出了新的贝叶斯滤波模型,通过对比各种参数指标可知,新算法在散斑抑制和边缘保持上具有更好的效果。

贝叶斯非局部滤波器为^[17]

$$\hat{u}(x_i) = \frac{\sum_{x_j \in \Delta_i} p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)] p[\mathbf{u}(x_i)] u(x_i)}{\sum_{x_j \in \Delta_i} p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)] p[\mathbf{u}(x_i)]}, \quad (33)$$

式中 $u(x_i)$ 为无噪图像, $v(x_j)$ 为含噪图像, $\mathbf{u}(x_i)$ 、 $\mathbf{v}(x_j)$ 分别为大小为 $D \times D$ 中心位于像素 x 的方形相似窗口和 Δ_i 中心位于像素 x_i 的方形搜索窗口, $\hat{u}(x_i)$ 为非局部算法复原图像, $p[\mathbf{u}(x_i)]$ 为 $\mathbf{u}(x_i)$ 的概率分布函数, $p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)]$ 为 $\mathbf{u}(x_i)$ 已知条件下, $\mathbf{v}(x_j)$ 的条件分

布函数, $p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)]p[\mathbf{u}(x_i)]$ 为 $\mathbf{v}(x_j)$ 和 $\mathbf{u}(x_i)$ 的相似性度量值。

叶斯非局部滤波模型。假设散斑噪声满足独立分布条件, 则条件分布 $p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)]$ 为

针对偏振成像的统一散斑模型, 推导了新的贝

$$p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)] = \prod_{d=1}^{D \times D} p[v_d(x_j) | u_d(x_i)], \quad (34)$$

式中 $u_d(x_i)$ 和 $v_d(x_j)$ 分别为相应像素块中第 d 个像素, 采用(32)式统一散斑模型, 则

$$p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)] \propto \frac{\Gamma(\mu + \mu_2 + \mu_3)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\mu_2)\Gamma(\mu_3)} \exp\left\{-\frac{[\mathbf{v}(x_j) - \mathbf{u}(x_i)]^2}{2u(x_i)^{2(\mu + \mu_2 + \mu_3)}}\right\}, \quad (35)$$

$$p[\mathbf{v}(x_j) | \mathbf{u}(x_i)] = \prod_{d=1}^{D \times D} p[v_d(x_j) | u_d(x_i)] \propto \left[\frac{\Gamma(\mu + \mu_2 + \mu_3)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\mu_2)\Gamma(\mu_3)}\right]^{D \times D} \exp\left\{-\sum_{d=1}^{D \times D} \frac{[v_d(x_j) - u_d(x_i)]^2}{2u_d(x_i)^{2(\mu + \mu_2 + \mu_3)}}\right\}. \quad (36)$$

进而根据(33)式, 即可完成散斑去噪。

扩散 (SRAD) 滤波器和最优贝叶斯非局部滤波 (OBNLM) 进行比较。首先选取一幅激光偏振成像装置对一幅测试图片进行成像。各种算法的滤波参数如表 1 所示。各种滤波算法处理图片的效果如图 6 所示。

5 实验结果

为了评价改进的贝叶斯非局部滤波算法 (IBNLM) 的性能, 将其与散斑去噪算法、Lee 滤波器、Kuan 滤波器、异向扩散滤波器 (AD)、各向异性

表 1 滤波器参数设置 (非局部滤波 $\Delta_i = 11 \times 11$)

Table 1 Filter parameters setting (nonlocal filter $\Delta_i = 11 \times 11$)

Filters	Iterations	Filter parameters	Threshold	Filtering windows
Lee				2×2
Kuan				2×2
AD	60	0.01	30	
SRAD	50	0.08		
OBNLM		12	0.9	7×7
IBNLM		12		9×9

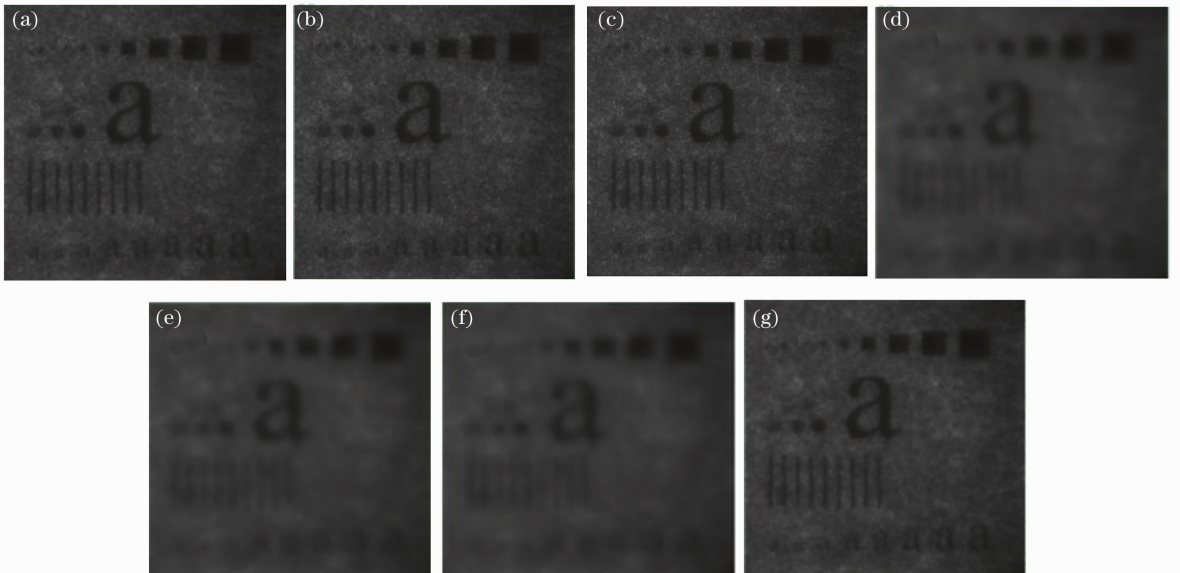


图 6 不同算法的处理效果图。(a) 原始图像; (b) Lee 处理结果; (c) Kuan 处理结果; (d) AD 处理结果; (e) SRAD 处理结果; (f) OBNLM 处理结果; (g) IBNLM 处理结果

Fig. 6 Processing results of different algorithms. (a) Original image; (b) Lee; (c) Kuan; (d) AD; (e) SRAD; (f) OBNLM; (g) IBNLM

其等效视数 (ENL) 和边缘保持指数 (EPI) 如表 2 所示。

表 2 等效视数和边缘保持指数

Table 2 Equivalent number of looks and edge preserve index

Filters	ENL	EPI
Lee	23.73	0.72
Kuan	23.73	0.70
AD	22.89	0.59
SRAD	25.51	0.70
OBNLM	24.49	0.55
IBNLM	28.19	0.79

另外一幅图片选取激光偏振装置对金属飞机和涂漆飞机进行成像, 各种算法的滤波参数如表 3 所

示。各种算法的处理结果如图 7 所示。其等效视数和边缘保持指数, 如表 4 所示。

表 3 滤波器参数设置 (非局部滤波 $\Delta_i = 33 \times 33$)

Table 3 Filter parameters setting (nonlocal filter $\Delta_i = 33 \times 33$)

Filters	Iterations	Filtering parameters	Threshold	Filtering windows
Lee				5×5
Kuan				5×5
AD	70	0.01	40	
SRAD	60	0.08		
OBNLM		12	0.8	11×11
IBNLM		12		9×9

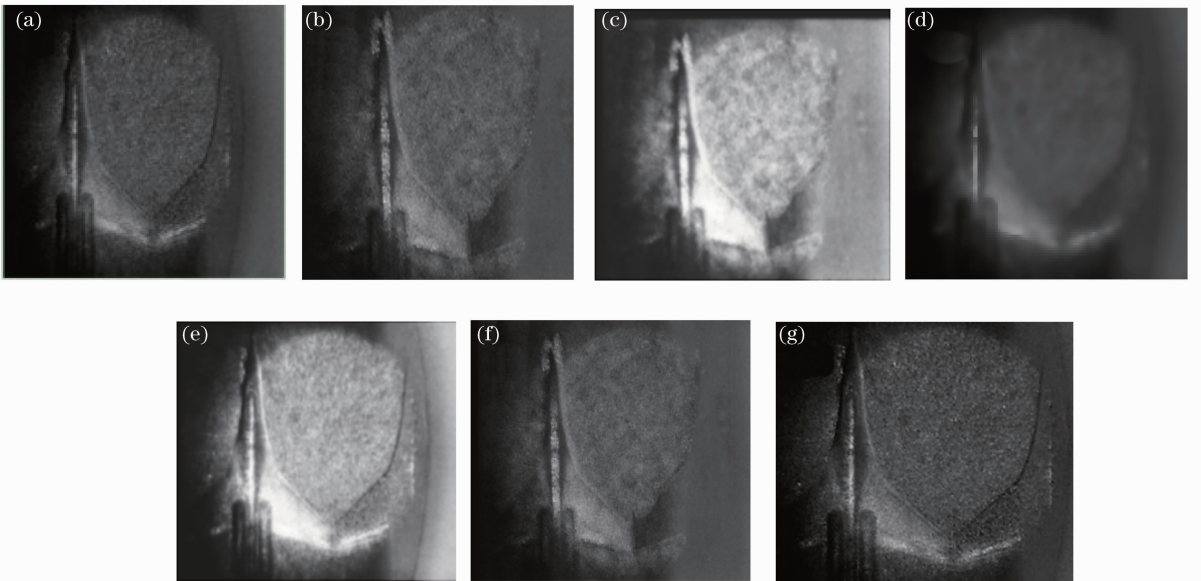


图 7 各种算法的处理结果图。(a) 原始图像; (b) Lee 处理结果; (c) Kuan 处理结果; (d) AD 处理结果;

(e) SRAD 处理结果; (f) OBNLM 处理结果; (g) IBNLM 处理结果

Fig. 7 Processing results of different algorithms. (a) Original image; (b) Lee; (c) Kuan; (d) AD; (e) SRAD;

(f) OBNLM; (g) IBNLM

表 4 等效视数和边缘保持指数

Table 4 Equivalent number of looks and edge preserve index

Filters	ENL	EPI
Lee	15.37	0.79
Kuan	17.56	0.67
AD	19.78	0.55
SRAD	16.35	0.71
OBNLM	16.59	0.69
IBNLM	21.83	0.82

斑统一概率模型。通过比较散斑与像素的大小, 将散斑分为小散斑和大散斑, 实验和理论结果表明, 散斑归一化均值不受像素的影响, 归一化方差与像素成反比例关系。进而提出了统一的散斑概率模型, 该模型能够很好表征散斑概率模型。根据散斑统一概率模型, 提出了改进的贝叶斯非局部散斑抑制算法, 通过实验数据表明, 该算法在散斑抑制和边缘保持上都优于经典的散斑抑制算法。

参 考 文 献

1 M. Shankar. A general statistical model for ultrasonic backscattering from tissues [J]. *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2000, **47**(3): 727~736
 2 T. Eltoft. Modeling the amplitude statistics of ultrasonic images

6 结 论

运用穆勒矩阵法建立了激光偏振成像系统的散

- [J]. *IEEE Trans. Medical Imaging*, 2006, **25**(2): 229~240
- 3 Y. Delignon, W. Pieczynski. Modeling non-Rayleigh speckle distribution in SAR images[J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(6): 1430~1435
- 4 A. Achim, E. E. Kuruoglu, J. Zerubia. SAR image filtering based on the heavy-tailed Rayleigh model[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(9): 2686~2693
- 5 J. M. Nicolas. Gamma mixture modeled with "second kind statistics": application to SAR image processing [C]. *IEEE International in Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002
- 6 Dai Enwen, Sun Jianfeng, Yan Aimin *et al.*. Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0528003
戴恩文, 孙建锋, 闫爱民 等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验室验证[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0528003
- 7 Liu Hengbiao, Zhou Yajie, Wang Changling. Surface roughness measurement based on dichromatic digital speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412006
刘恒彪, 周亚杰, 王昌灵. 双波长数字散斑相关法表面粗糙度测量[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412006
- 8 S. E. Skipetrov, J. Peuser, R. Cerbino *et al.*. Noise in laser speckle correlation and imaging techniques[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 14519~14534
- 9 M. E. Buemi, J. Jacobo, M. Mejail. SAR image processing using adaptive stack filter[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, **31**(1): 307~314
- 10 G. Liu, X. Zeng, F. Tian *et al.*. Speckle reduction by adaptive window anisotropic diffusion [J]. *Signal Processing*, 2009, **89**(11): 2233~2243
- 11 J. J. Ranjani, S. J. Thiruvengadam. Dual-tree complex wavelet transform based SAR despeckling using interscale dependence[J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(6): 2723~2731
- 12 M. Amirmazlaghani, H. Amindavar. Two novel Bayesian multiscale approaches for speckle suppression in SAR images[J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(7): 2980~2993
- 13 K. B. Eom. Anisotropic adaptive filtering for speckle reduction in synthetic aperture radar images[J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(5): 57206~57215
- 14 J. Yu, J. Tan, Y. Wang. Ultrasound speckle reduction by a SUSAN-controlled anisotropic diffusion method [J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**(9): 3083~3092
- 15 Jia Dagong, Ma Caibin, Wu Liqiang *et al.*. Denosing of electronic speckle interferogram based on improved spin filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0311001
贾大功, 马彩缤, 武立强 等. 基于改进旋滤波的电子散斑干涉图滤波方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0311001
- 16 Liu Liren. Structure and operation mode of synthetic aperture laser imaging lidar for speckle reduction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1028001
刘立人. 基于散斑抑制的合成孔径激光成像雷达的结构和工作模式[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1028001
- 17 P. Coupe, P. Hellier, C. Kervrann *et al.*. Nonlocal means-based speckle filtering for ultrasound images[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2009, **18**(10): 2221~2229
- 18 A. Buades, B. Coll, J. M. Morel. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. *Multiscale Modeling Simulation*, 2005, **4**(2): 490~530

栏目编辑: 李文喆