

SAR 图像相干斑抑制中的像素相关性测量

李光廷^{*①②} 杨亮^{①②} 黄平平^③ 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

^③(内蒙古工业大学信息工程学院 呼和浩特 010051)

摘要: 像素相关性(Pixel Relativity, PR)测量是权重平均相干斑抑制算法中的关键技术, 该文从3个方面对 SAR 图像中的 PR 模型进行了研究。首先, 该文论述了比值 PR 模型的合理性, 提出了两种新的比值 PR 模型(对数高斯模型与像素相似概率模型), 并将 SAR 图像概率密度函数与比值概率密度函数转化为比值 PR 模型; 然后, 为了对 4 种 PR 模型应用于相干斑抑制的性能进行比较, 设计了基于 PR 的权重最大似然滤波器; 最后, 针对相关性最大值位置不为 1 的 PR 模型存在的辐射保持能力差的问题, 提出了模型最大值位置校正的方法。理论分析与实验表明了提出模型及最大值位置校正方法的有效性。

关键词: SAR 图像; 相干斑抑制; 像素相关性; 比值

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)03-0301-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20025

The Pixel-similarity Measurement in SAR Image Despeckling

Li Guang-ting^{①②} Yang Liang^{①②} Huang Ping-ping^③ Yu Wei-dong^①

^①(Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The Pixel Relativity (PR) measurement of SAR image, which is the key of the despeckling techniques based on weighted average, is researched in three aspects. Firstly, the rationality of ratio PR model is expounded, and two new ratio PR models, which are the LOG-domain Gaussian model and the pixel similarity probability model, are proposed. Meanwhile, the Probability Density Function (PDF) of SAR image and the PDF of the ratio between pixels are transformed into ratio PR models. Then, in order to evaluate the four ratio PR models, the weighted maximum likelihood filters are designed using the PR. Finally, a novel method, performed by calibrating the maximum location of the PR model, is introduced to improve the radiation preservation of those models whose maximum do not locate at 1. The effectiveness of the two proposed PR models and the approach to calibrate the maximum location of the PR model, are indicated by the theoretical analysis and experimental comparison.

Key words: SAR image; Despeckling; Pixel Relativity (PR); Ratio

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)本身具有全天时全天候成像和穿透性强的特点, 在目标识别、资源勘探等军用、民用领域得到了越来越广泛的应用。由于 SAR 自身相干成像的机理, 使得 SAR 图像不可避免受到相干斑的干扰, 相干斑的存在给 SAR 图像的解译与信息提取带来了极大的

困难, 因此相干斑抑制一直是 SAR 图像应用领域的研究热点。

SAR 图像的相干斑抑制可以通过成像过程中的多视处理来实现, 也可以通过成像后的滤波处理来实现。多视处理通常以牺牲图像的空间分辨率为代价来提高图像的辐射分辨率, 然而成像后的滤波处理却可以在提高图像质量的同时避免空间分辨率的损失, 因此 SAR 图像的相干斑抑制主要集中在滤波算法的研究上。从模型上讲, SAR 图像的相干斑抑制可以分为权重平均与最大后验概率估计两种。经典的权重平均算法有 Lee 滤波, Kuan 滤波及它们的

2012-04-16 收到, 2012-05-15 改回; 2012-05-22 网络优先出版
内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(MJZZ11069)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2011BS0904)资助课题

*通信作者: 李光廷 li_gt@yahoo.cn

改进算法,经典的极大后验概率估计算法是 Gamma MAP 滤波^[1]。基于小波变换的相干斑抑制算法也可以归结到这两类算法中。

在权重平均算法中,一类是基于图像的局域同质性来决定邻域像素权重的,如经典的 Lee 与 Kuan 算法,这类算法不能根据图像的结构自动调整邻域的权值,不可避免会引起细节的模糊。近年来人们发展了一类基于像素相关性(Pixel Relativity, PR)的权重平均滤波算法^[2,3],并将其扩展到了 SAR 图像相干斑抑制中^[4-6],它衡量邻域像素与当前像素(或当前像素估计值)的相关性,按相关性对不同的邻域像素赋不同的权值,该类算法具有一定的结构自适应能力,可以较好保持图像细节信息。由于权值反映了邻域像素与当前像素的相关性,因此 PR 模型的选择是影响权重平均滤波算法性能的关键技术。

本文在论述了比值 PR 模型的合理性之后,首先提出了两种新的基于比值的 PR 模型,并将现有两种非比值 PR 模型转化为比值 PR 模型;然后设计了基于 PR 系数的权重平均抑斑算法,用于根据抑斑效果来比较各 PR 模型的优劣;实验过程中针对最大值位置不为 1 的 PR 模型辐射保持能力差的问题,提出了最大值位置校正的方法;最后进行了不同像素相关性度量模型的理论分析与实验比较。

2 基于比值的 SAR 图像的像素相关性模型

像素相关性是用于衡量图像中两像素同时属于同一均匀区域的概率的指标。考虑到 SAR 图像乘性噪声的特点,基于比值的像素相关性测量是可行的,Feng 等人^[6]证明比值模型可以很好地保持 SAR 图像真实的像素相关性。设给定 SAR 幅度图像 $f=\{f(x)|x=(x_1, x_2)\}$,其中 x_1, x_2 分别为图像的横、纵坐标,定义像素 $x=(x_1, x_2)$ 与像素 $\xi=(\xi_1, \xi_2)$ 之间的像素相关性为

$$P_R(f(x), f(\xi)) = P_R(r) \quad (1)$$

式中 $r=f(\xi)/f(x)$, $P_R(\cdot)$ 为 PR 数值的大小。基于比值的 SAR 图像 PR 模型应具有以下基本特征:

- (1) 两像素值相等时, PR 具有最大值 1,即 $P_{R-\max}=P_R(1)=1$ 。
- (2) 进行相关性计算的两像素有可互换性,即 $P_R(r)=P_R(1/r)$ 。

2.1 基于比值的像素相关性模型

本节以两像素 x 与 ξ 的相关性度量为例,逐一引出本文的 4 种 PR 模型,首先是本文提出的两种新的比值 PR 模型:对数高斯模型与像素相似性概率模型。

(1) 对数高斯模型(LOG-Gau) C. Tomasi 和 R. Manduchi 提出了一种用双高斯模型进行图像去噪的 Bilateral 滤波器^[2],由于本文的研究对象是 PR 模型,因此这里只考虑基于高斯模型的 PR 测量。原有的高斯模型是针对加性高斯噪声提出的,而 SAR 图像的相干斑噪声为乘性噪声,原模型显然不适用。有人提出首先对 SAR 图像进行对数变换,Xie 等人^[7]证明,对数变换后的相干斑噪声在视数较高时接近加性高斯噪声。由此得出基于对数高斯模型的 SAR 图像比值 PR 模型为

$$\begin{aligned} P_{R-\text{LOG}}(f(x), f(\xi)) &= \exp\left[-\frac{(\log(f(\xi)/f(x)) - \mu_{r-\text{LOG}})^2}{2\sigma_{r-\text{LOG}}^2}\right] \\ &= \exp\left[-\frac{(\log(r) - \mu_{r-\text{LOG}})^2}{2\sigma_{r-\text{LOG}}^2}\right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\mu_{r-\text{LOG}}, \sigma_{r-\text{LOG}}$ 为对数变换后噪声的均值与方差,按照 Xie 等人^[7]给出的强度均方根模型对应的对数变换后的均值与方差来计算。

(2) 像素相似概率模型(Pixel Similarity Probability, PSP) 现有的 PR 模型均将当前像素作为区域真值,只考虑了邻域像素同当前像素的比值,而未考虑局域真值不同时具有相同比值的两像素的相关性可能不同。Deledalle 等人^[5]考虑了区域真值不同时的像素相似性并对该相似性进行累积作为 PR 系数。对 Deledalle 等人给出的 PSP 模型进行变换,得到基于 PSP 的 SAR 图像比值 PR 模型为

$$\begin{aligned} P_{R-\text{PSP}}(f(x), f(\xi)) &= \left[2f(x)f(\xi)/(f(x)^2 + f(\xi)^2)\right]^{2L-1} \\ &= \left[\frac{2}{r+1/r}\right]^{2L-1} \end{aligned} \quad (3)$$

在提出上述两种新的 PR 模型后,再介绍两种现有的 PR 模型,并将它们转化为比值 PR 模型。

(3) SAR 图像似然概率密度模型(SAR-PDF)

由于 SAR 图像的似然 PDF 本身含有观测值对真值隶属度的意义,因此常用来衡量两像素的相关性^[8]。将其转化为比值模型,得到基于 PDF 的比值 PR 模型为

$$\begin{aligned} P_{R-\text{PDF}}(f(x), f(\xi)) &= K_{\text{norm}} \left(\frac{f(\xi)}{f(x)}\right)^{2L-1} \exp\left[-L\left(\frac{f(\xi)}{f(x)}\right)^2\right] \\ &= K_{\text{norm}} \exp(-Lr^2)r^{2L-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 L 为图像的视数, K_{norm} 为最大值归一化系数。需要说明的是,滤波时可以用局域的估计值代替式中的 $f(x)$,并且不同的估计值对滤波效果影响较大,由于本文研究目的是衡量邻域像素与当前像素的 PR 模型,这里未对当前像素的真值进行估计。

(4) 比值距离概率密度模型(Ratio-PDF)

Feng 等人^[6]推导了 SAR 图像比值距离的 PDF 并用该 PDF 来衡量像素的相关性。将其转化为比值模型，得到基于比值距离 PDF 的比值 PR 模型为

$$P_{R-Ratio}(f(x), f(\xi)) = K_{norm} \frac{r^{2L-1}}{(r^2 + 1)^{2L}} \quad (5)$$

式中 K_{norm} 同样为最大值归一化系数。

在引出 4 种比值 PR 模型后，下面首先对 4 种模型进行简单分析。

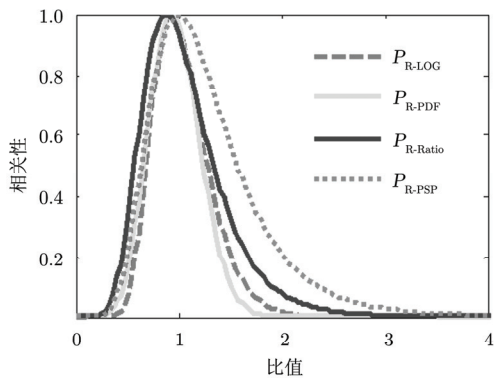
2.2 4 种比值像素相关性模型分析

分析式(2)-式(5)可得 4 种比值 PR 模型的最大值位置，如表 1 所示。

表 1 相关性度量模型比较

比值 PR 模型	最大值位置
对数高斯(LOG-Gau)	$\exp(\mu_{r-LOG})$
SAR 概率密度(SAR-PDF)	$\sqrt{(2L-1)/(2L)}$
比值概率密度(Ratio-PDF)	$\sqrt{(2L-1)/(2L+1)}$
像素相似概率(PSP)	1

如表 1 所示，只有 PSP 模型在 $r=1$ 取得最大值，并且分析易知只有它满足像素可互换性。以 4 视幅度 SAR 图像为例，图 1(a)给出了 4 种 PR 模型随比值的变化的变化。假设 $f(x)$ 为真值，则 SAR-PDF 模型对应观测值 $f(\xi)$ 的概率密度函数，如图中 P_{R-PDF} 所示；如图，另外 3 种模型也都呈现出 P_{R-PDF} 具有的快速上升且长拖尾的特性，这显示了用比值进行 SAR 图像像素相关性测量的合理性。



(a) 比值相关性

由于除 PSP 模型外的其它 3 种模型的最大值位置均不为 1，因此在图 1(b)中给出了 4 种模型的最大值位置随视数的变化，由图可以看出，随着视数的增加，其它 3 种模型的最大值位置逐渐逼近于 1。

由对各模型的分析及比较可知：

(1) 4 种基于比值的像素相关性测量均与 SAR 图像相干斑的乘性特性及其统计特性相匹配。

(2) PSP 模型满足最大值位置为 1 且具有像素可互换性的特征。

(3) 随视数升高，LOG-Gau, SAR-PDF 及 Ratio-PDF 这 3 种相关性测量模型最大值的位置渐近于它们的理想位置。

上述分析显示基于 PSP 的比值 PR 模型优于另外 3 种模型。由于 SAR 图像真实的 PR 难以计算，为了增强结论的可靠性，下面我们将各模型应用到相干斑抑制中，从实验的角度来比较各 PR 模型。

3 基于相干斑抑制的像素相关性模型的比较

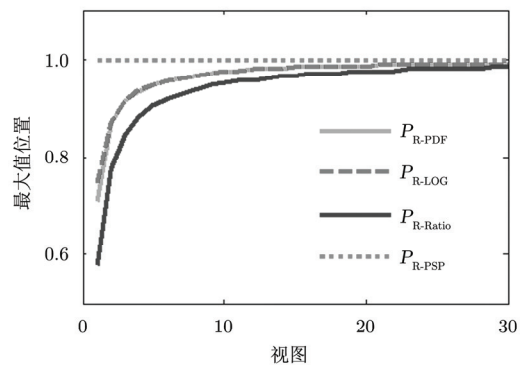
本节首先设计了基于 PR 系数的 SAR 图像权重最大似然估计器，并分析了用相干斑抑制进行 PR 模型比较的可行性；在给出相干斑抑制评价指标后，进行了仿真 SAR 图像的相干斑抑制实验，同时对实验结果进行了分析。

3.1 基于像素相关性的 SAR 图像权重最大似然估计器

为了说明用相干斑抑制进行 PR 模型比较的可行性，首先构造了基于 PR 的 SAR 图像权重最大似然估计器。对给定的幅度 SAR 图像 f ，像素 x 幅度的估计为^[2,5]

$$\hat{f}(x) = \sqrt{\frac{\sum_{\xi} P_R(f(x), f(\xi)) f(\xi)^2}{\sum_{\xi} P_R(f(x), f(\xi))}} \quad (6)$$

式中 ξ 为 x 矩形邻域中的像素。如上所示，两像素的相关性 $P_R(f(x), f(\xi))$ 作为像素 ξ 的权重进行 x 的估计。



(b) 最大值位置随视数的变化

图 1 基于比值的相关性度量比较

理想的 PR 模型应该具有以下特点:

(1) 当像素 ξ 与 x 位于同一均匀区域时,两像素的相关性较大,即 $f(\xi)$ 的权重较大。

(2) 当像素 ξ 与 x 位于不同均匀区域时,两像素的相关性偏小,即 $f(\xi)$ 的权重较小。

不同均匀区域像素具有较小的权重可以使细节得到较好保持,而同一均匀区域像素有较大的权重则可以使区域内的噪声得到最大的抑制。因此可以通过评价相同实验条件下不同 PR 模型的相干斑抑制效果来比较各模型的准确性。

为了表达需要,我们根据不同的 PR 模型分别对不同的权重最大似然估计器命名为 LOG-Gau 滤波器、SAR-PDF 滤波器、Ratio-PDF 滤波器及 PSP 滤波器。

3.2 相干斑抑制效果的评价指标

SAR 图像抑斑效果的好坏需要由主观和客观两方面评价,而主观评价往往有不确定性,因此我们从细节保持与噪声平滑两方面对抑斑效果进行客观评价,本文用到了以下的抑斑效果评价指标:

(1) MSE: 该指标用于进行仿真图像去斑效果的评价,是滤波结果与无噪声图像间的均方误差 (Mean Square Error, MSE)。这里我们除了用整体图像的均方误差 (MSE of the Whole image, W-MSE) 来评价整体去斑效果外,还对仿真图像细节区域均方误差 (MSE of the Detail area, D-MSE) 进行计算用于评价不同算法的细节恢复能力。MSE 越小,则对应的滤波效果越好。

(2) ENL: 图像同质区域的等效视数,用于评价不同算法的噪声平滑能力^[9]。ENL 越大,则噪声平滑能力越强。

(3) Mean(f/f^*): 滤波前图像 f 与滤波后图像 f^* 之间比值的均值,用于评价滤波算法的辐射保持能力。它的理想值是相干斑噪声的一阶矩,对 L 视的幅度 SAR 图像,该理想值的计算公式为^[10]

$$E[\text{Mean}(f/f^*)] = \frac{\Gamma(L+1/2)}{\Gamma(L) \cdot \sqrt{L}} \quad (7)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

(4) Speckle: 滤波前图像与滤波结果之间比值图像的等效视数,常用于评价算法对整体图像的滤波效果,其理想值是滤波前图像的等效视数^[9],较小的 Speckle 大多由细节区域的模糊引起,而较大的 Speckle 则表明同质区域含有抑制不完全的相干斑噪声。

我们用仿真与实测的 SAR 图像对 4 种像素相关性滤波器进行了比较。为了比较结果的公平性,对

各滤波器均采用 3×3 窗口并进行 5 次迭代,采用小的窗口有利于细节的保持而迭代则可以加强均匀区域的噪声平滑。下面首先讨论仿真 SAR 图像的实验情况。

3.3 仿真 SAR 图像实验结果

合成的含有点目标与线目标的仿真图像,如图 2(a)所示;并提取了合成图像的细节信息用于进行细节保持的评价,如图 2(b)所示;图 2(a)被视数为 3 的乘性相干斑噪声污染的结果如图 2(c)所示;4 种基于 PR 模型滤波器的滤波结果及它们的比值图像如图 2(d)~图 2(k)所示。

观察图 2 可以发现各滤波结果中均含有一定的类似椒盐噪声的现象,这些残留噪声是均匀区域中偏离其真值较远的点。由于这些点偏离真值较远使得它们与周围邻域像素的相关性较小,因而在滤波过程中基本保持不变呈现出了椒盐噪声的特征。这些点可以通过适当后处理加以去除,由于本文的研究目的在于比较不同的 PR 模型,为了使比较结果更有说服力,这里未进行任何后处理。同时还可以注意到,不同方法椒盐噪声的程度不同,PSP 滤波结果中的椒盐噪声极少,而 SAR-PDF 滤波结果中的椒盐噪声最多。比较各滤波结果比值图可以发现,PSP 滤波结果的比值图含有较明显的细节信息,而另外 3 个滤波结果比值图中的细节信息不明显,因此 PSP 滤波器可能更容易引起细节的模糊。

对各滤波结果的量化评价如表 2 所示,其中对数高斯、SAR-PDF 及比值 PDF “改进前”对应图 2 所示滤波结果的评价。表 2 中各指标均显示,PSP 滤波器具有最优抑斑效果,D-MSE 显示了该方法优秀的细节还原能力,ENL 显示了它强大的噪声平滑能力,Mean(f/f^*)显示了它很好的辐射保持能力,W-MSE 与 Speckle 则从整体上显示了该方法强大的去斑能力。

比值图显示 PSP 滤波器容易引起细节的模糊,而表 2 中 D-MSE 则显示该滤波较强的细节保持能力。PSP 滤波器的 D-MSE 较低是由于它对均匀区与细节区都有较强的噪声平滑能力,因此在细节有一定模糊的情况下仍可以提高细节部分信噪比,另外 3 种滤波器较差的噪声平滑能力导致了较大的 D-MSE。

仿真 SAR 图像的实验结果及分析显示:在同等实验条件下,PSP 滤波器的抑斑效果明显优于另外 3 种滤波器。这与前面对 4 种模型进行理论分析时得出的结论是一致的。

另外,表 2 中 LOG-Gau, SAR-PDF 与 Ratio-PDF 滤波结果的 Mean(f/f^*)值均偏大,这显示了

它们较差的辐射保持能力。接下来对这 3 种滤波器辐射保持能力差的问题进行分析，并提出本文的解决方法。

4 基于最大值位置校正的像素相关性模型及实测数据验证

本小节针对 LOG-Gau, SAR-PDF 与 Ratio-PDF 这 3 种 PR 模型滤波器辐射保持能力差的问题提出

了模型最大值位置校正的方法，并对校正后的模型通过仿真与实测 SAR 图像进行了检验。

4.1 基于最大值位置校正的像素相关性模型

上述 3 种 PR 模型滤波器较差的辐射保持能力是由 3 种 PR 模型相关性最大值的位置均小于 1 所引起的，如图 1(a)所示，小于当前像素值的邻域像素赋以较大权重使得基于这 3 种模型的估计结果均偏小，因此比值图均值 $\text{Mean}(f/f^*)$ 偏大。为解决 3

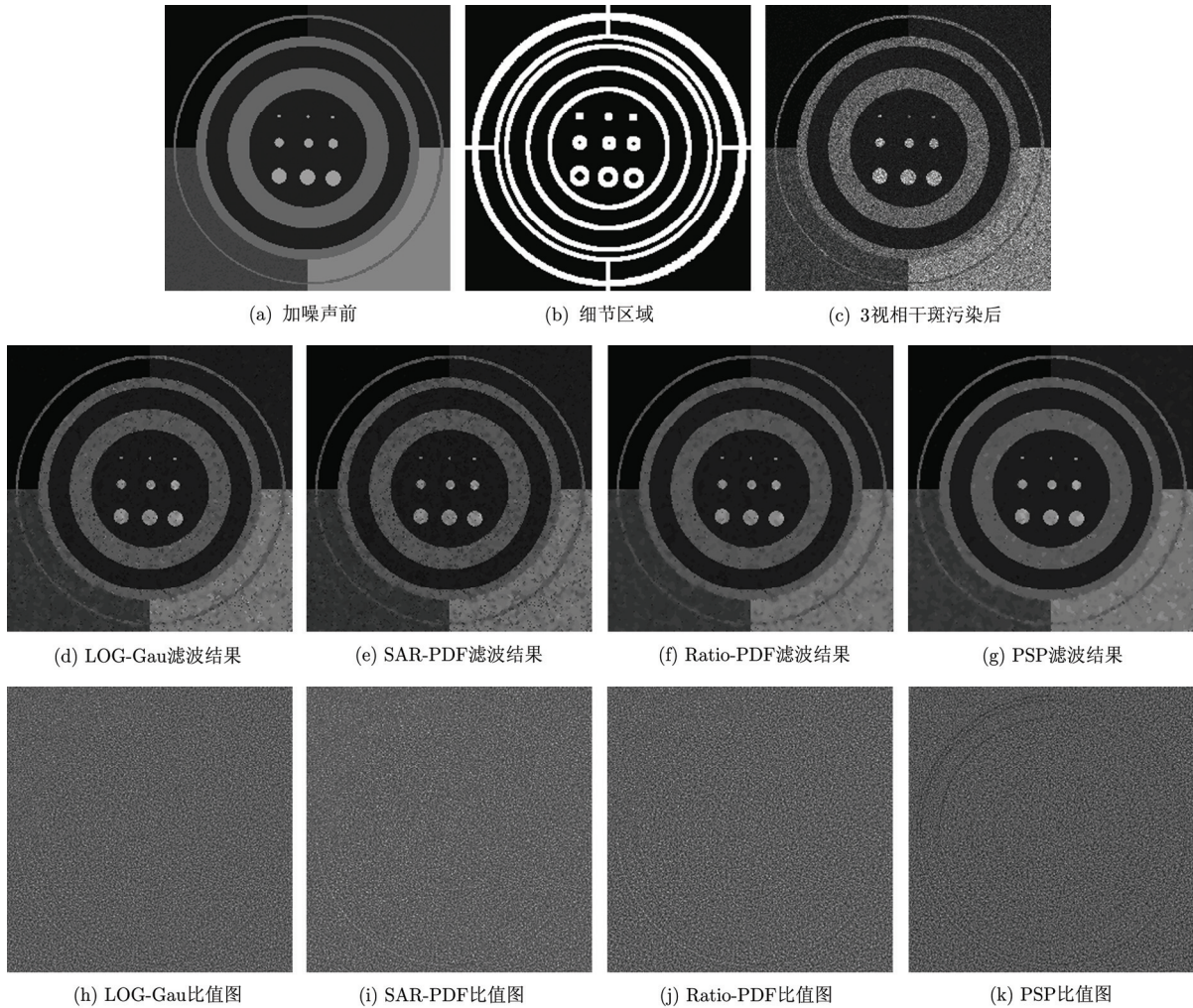


图 2 仿真图像的滤波结果

表 2 仿真图像滤波效果评价

指标/方法	理想值	滤波前	LOG-Gau		SAR-PDF		Ratio-PDF		PSP
			改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后	
W-MSE	0	452.36	104.38	77.80	154.30	101.51	74.48	42.94	38.58
D-MSE	0	549.83	166.38	131.96	228.57	158.68	133.26	90.66	85.64
ENL	∞	3.17	22.73	22.54	17.15	17.12	50.09	57.83	68.49
$\text{Mean}(f/f^*)$	0.9598	1	1.017	0.9619	1.0702	1.004	1.0287	0.9594	0.9510
Speckle	3.17	3.17	5.10	4.73	5.41	4.95	4.09	3.98	3.87

种 PR 滤波器辐射保持差的问题, 对它们进行了适当的改进, 将 3 种模型的最大值校正到 1 的位置上 (具体实现: LOG-Gau 模型令 $\mu_{r-LOG}=0$, SAR-PDF 与 Ratio-PDF 令式(3), 式(4)中的 r 乘表 1 中对应的最大值位置系数), 并继续进行 PSP 滤波器与改进后的另外 3 种滤波器的比较。改进后的滤波指标如表 2 中 3 种滤波器对应“改进后”所示, 对比表中各指标得:

(1) 各方法的滤波效果均得到了一定改善, 尤其辐射保持能力得到了较大的提高, 改进后的 LOG-Gau 滤波器与 Ratio-PDF 滤波器辐射保持能力均超过了 PSP 滤波器。

(2) PSP 滤波器仍比改进后的 3 种 PR 模型滤波器具有更好的噪声平滑能力与细节保持能力。

上述两点表明, 改进后的比值 PDF 的 PR 模型准确度接近于基于 PSP 的 PR 模型准确度, SAR PDF 模型的 PR 模型测量效果最差。PSP 滤波器优秀的相干斑抑制效果表明基于 PSP 的 PR 模型优于另外 3 种 PR 模型。为了验证上述结论对实测 SAR 图像 PR 测量的适用性, 下面我们给出了一组实测 SAR 图像经 4 种滤波器处理的抑斑结果, 并进行了相应的量化评价。

4.2 实测 SAR 图像实验结果

本节给出了一组实测 SAR 图像经 4 种像素相关滤波器处理的抑斑结果。选用的一组有代表性的 SAR 图像包括: (1) Bedfordshire 地区含有农田、植被与人造建筑的 X-SAR 图像 (Bedford: 3 视, 256×256); (2) Sandia 实验室公开的含有坦克的 MiniSAR 图像 (Target: 2 视, 300×300); (3) Sandia 实验室的 Ku-SAR 对五角大楼的成像 (Pentagon: 2 视, 400×400)。由仿真实验的分析知, 除 PSP 滤波器外的另外 3 种滤波器在改进后的滤波效果均得到一定改善, 本节只用改进后的滤波器对实测 SAR 图像进行处理, 本节提到的 LOG-Gau, SAR-PDF 与 Ratio-PDF 滤波器均为相应的相关性模型经过最大值位置校正的滤波器。各方法对实测图像的滤波结果如图 3 所示, 滤波效果的评价如表 3 所示。

观察图 3 可以发现: PSP 滤波结果具有最优的视觉效果, 它的同质区域平滑, 细节保持良好, 并且椒盐噪声最少。Ratio-PDF 滤波器与 PSP 滤波器有相似的噪声平滑能力与细节保持能力, 但它含有稍多的椒盐噪声。SAR-PDF 滤波结果中大量的椒盐噪声严重影响了它的视觉效果。LOG-Gau 滤波结果也含有较多的残留斑点。比较表 3 中 ENL 与 Speckle 可以得出各滤波器的噪声平滑能力与整体抑斑效

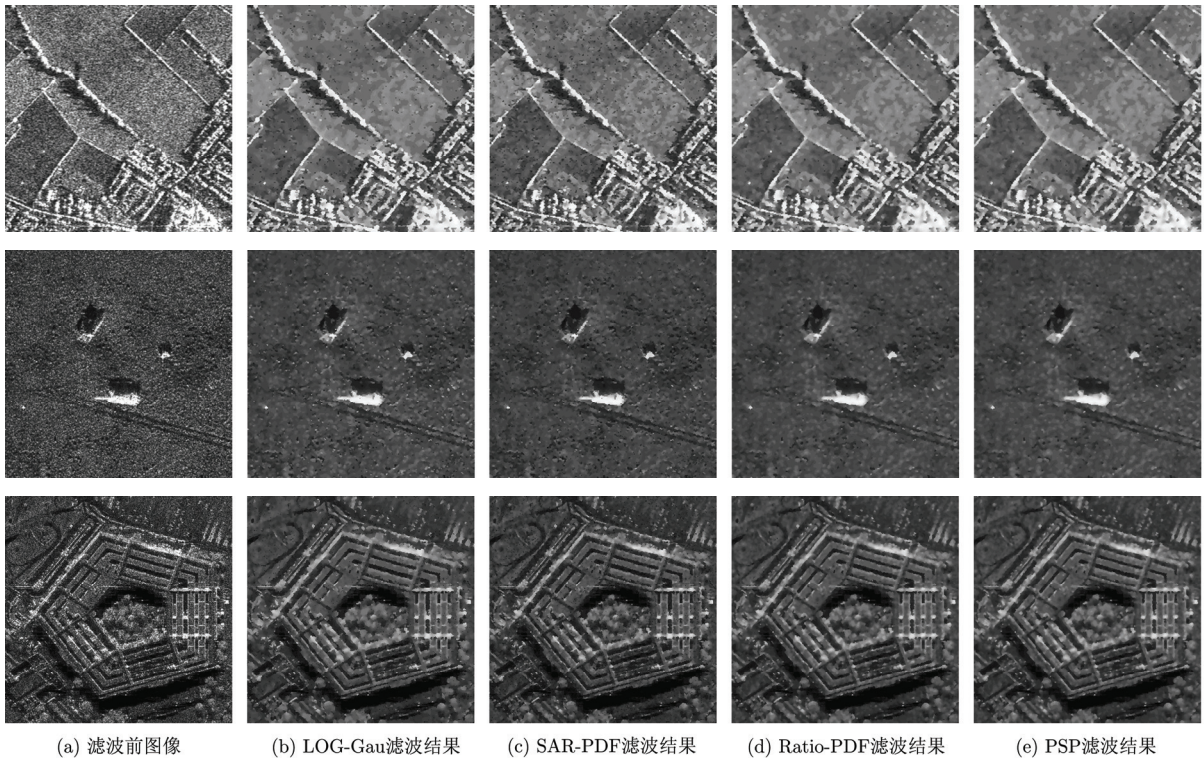


图 3 实测 SAR 图像滤波结果(从上到下: Bedford, Target, Pentagon)

表3 实测 SAR 图像滤波效果评价

图像	指标/方法	理想值	LOG-Gau	SAR PDF	Ratio-PDF	PSP
Bedford	ENL	∞	19.91	18.15	37.06	39.03
	Mean(f/f^*)	0.9630	0.9491	0.9961	0.9423	0.9357
	Speckle	3.31	6.06	6.57	4.59	4.41
Target	ENL	∞	11.69	10.54	19.01	20.37
	Mean(f/f^*)	0.9263	0.9291	1.0005	0.9334	0.9168
	Speckle	1.61	2.57	2.62	2.10	2.04
Pentagon	ENL	∞	11.37	8.13	15.98	16.72
	Mean(f/f^*)	0.9348	0.9184	0.9918	0.9105	0.9093
	Speckle	1.83	3.37	3.52	2.52	2.36

果由强到弱依次为: PSP, Ratio-PDF, LOG-Gau, SAR-PDF, 其中 PSP 与 Ratio-PDF 相接近, 并明显高于 LOG-Gau 与 SAR-PDF。比较辐射保持指标 Mean(f/f^*) 可以发现, LOG-Gau 滤波器的辐射保持能力最强, PSP 滤波器的辐射保持能力略差于 Ratio-PDF 滤波器。虽然 PSP 滤波器的辐射保持能力略差, 但它滤波结果的视觉效果最好且指标 Speckle 显示它整体抑斑效果最好。因此, 通过仿真实验得出的基于 PSP 的 PR 模型优于另外 3 种 PR 模型的结论在实测 SAR 图像中同样适用。

5 讨论与结论

本文研究了 SAR 图像相干斑抑制中的比值像素相关性模型。将提出的基于对数高斯和基于像素相似概率的两种比值像素相关性模型, 与现有的基于 SAR 图像 PDF 和基于像素比值 PDF 的两种像素相关性模型从相干斑抑制的角度进行了理论分析与实验比较。针对像素相关性模型最大值位置不为 1 的 3 个滤波器存在辐射保持能力差的问题, 提出了最大值位置校正的方法, 最后对校正后的各模型通过仿真与实测数据进行了比较验证。理论分析与实验验证得出的结论有:

(1) 基于比值的相关性模型适用于受乘性噪声污染的图像像素相关性测量^[6]。

(2) 基于像素相似概率的像素相关性测量模型明显优于最大值位置校正前的其它像素相关性模型。

(3) 对数高斯、SAR PDF 与比值 PDF 像素相关性模型的准确度经最大值位置校正后均得到改善。

(4) 基于像素相似概率的像素相关性测量略优于与改进后比值 PDF 的像素相关性测量, 但明显优于改进后的 SAR PDF 模型与对数高斯模型。

(5) 改进对数高斯滤波器的辐射保持能力最强。

上述由理论分析与实验验证得出的结论证明了本文提出的两种像素相关性模型及最大值位置校正方法的有效性。像素相关性不仅是 SAR 图像相干斑抑制方面的重要特征, 同时也是 SAR 图像分割、分类的重要特征。本文的研究结论可以用来根据不同的应用目的选择恰当的像素相关性模型。

参考文献

- [1] Lee J S and Jurkevich I. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 8(4): 313-340.
- [2] Tomasi C and Manduchi R. Bilateral filtering for grey and color images[C]. *Proceeding of International Conference Computer Vision (ICCV'98)*, New Delhi, India, 1998: 839-846.
- [3] Buades A, Coll B, and Morel J. A non-local algorithm for image denoising[C]. *Proceeding Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'05)*, San Diego, CA, 2005, 2: 60-65.
- [4] Zhang W G, Zhang Q, and Yang C S. Improved bilateral filtering for SAR image despeckling[J]. *Electronic Letters*, 2011, 47(4): 286-288.
- [5] Deledalle C, Denis L, and Tupin F. Iterative weighted maximum likelihood denoising with probabilistic patch-based weights[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(12): 2661-2672.
- [6] Feng H X, Hou B, and Gong M G. SAR image despeckling based on local homogeneous region segmentation by using pixel relativity measurement[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2724-2737.

- [7] Xie H, Pierce L E, and Ulaby F T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2002, 40(3): 721-727.
- [8] Molina D E, Gleich D, and Datcu M. Gibbs random field models for model-based despeckling of SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(1): 73-77.
- [9] 贾建, 陈莉. 基于双变量模型和非下采样 Contourlet 变换的 SAR 图像相干斑抑制[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(5): 1088-1094.
- Jia Jian and Chen Li. SAR image despeckling based on bivariate threshold function in NSCT domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1088-1094.
- [10] Oliver C and Quegan S. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*[M]. Boston: Artech House, 1998: 75-120.

作者简介



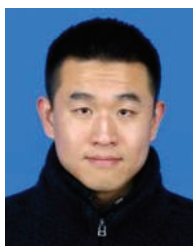
李光廷(1983-), 男, 山东泰安人, 2009年获郑州大学硕士学位, 同年进入中国科学院电子学研究所攻读博士学位, 研究方向为合成孔径雷达图像分割与分类。

E-mail: li_gt@yahoo.cn



黄平平(1978-), 男, 2007年获内蒙古工业大学硕士学位, 2010年获中国科学院电子学研究所博士学位, 现任教于内蒙古工业大学信息工程学院, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为合成孔径雷达信号处理与图像应用。

E-mail: hpp2304092@163.com



杨亮(1984-), 男, 山东烟台人, 2011年获苏州大学硕士学位, 同年进入中国科学院电子学研究所攻读博士学位, 研究方向为合成孔径雷达电磁计算与回波仿真。

E-mail: yangliang_mail@163.com



禹卫东(1969-), 男, 1997年获南京航空航天大学博士学位, 现工作于中国科学院电子学研究所, 研究员, 博士生导师, 长期从事合成孔径雷达信号处理技术研究。

E-mail: ywdsar@yahoo.com.cn