

改进的基于 Parzen 窗算法的 SAR 图像目标检测

张 颢 孟祥伟 刘 磊 李德胜

(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

摘 要 传统的 Parzen 窗检测算法假设目标占整个背景中较小的一部分,将 SAR 图像中的所有像素用于估计杂波概率密度函数,容易造成检测阈值的增大从而对不太明显的 SAR 图像舰船目标产生漏检。对此,提出了一种改进的 Parzen 窗检测算法,该算法通过自适应地设置目标窗口,将潜在的目标从检测图像中剔除,对剔除后的杂波背景采用 Parzen 窗进行非参数化的杂波模型估计,进而确定检测阈值,完成目标的检测。相比传统的 Parzen 窗检测算法,提出的 SAR 图像舰船目标检测算法减少了漏检数量,改善了检测性能。实测 SAR 图像的检测结果表明了该方法的有效性。

关键词 SAR 图像,舰船,检测,Parzen 窗

中图分类号 TN951 **文献标识码** A

Improved Parzen Window Based Ship Detection Algorithm in SAR Images

ZHANG Hao MENG Xiang-wei LIU Lei LI De-sheng

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract The classical Parzen algorithm is based on the assumption that the targets occupy a small part of the SAR image and uses all pixels of the SAR image to estimate the probability density function of the clutter background. This method results in the elevation of the detection threshold, and then it is possible to miss targets that are less obvious. In order to overcome this problem, we proposed an improved Parzen detection algorithm. The proposed algorithm adaptively sets the target windows according to the size of the target and deletes the potential targets from the background. Then it estimates the clutter distribution based on Parzen window method. Finally, it determines the detection threshold for the target detection. Compared with the traditional Parzen detection method, the proposed algorithm decreases the number of missing target and also improves the detection performance. The detection results with the real SAR images verify the effectiveness of the algorithm.

Keywords SAR image, Ship, Detection, Parzen windows

1 引言

合成孔径雷达是一种高分辨率的成像雷达,具有全天候、全天时及不受天气状况影响的特点。近年来,SAR 图像在海洋目标检测和海洋渔业监测等方面的应用越来越广泛,针对 SAR 图像进行目标检测的技术也日益完善。目前使用最为广泛的 SAR 目标检测技术仍以恒虚警率(CFAR)算法为主。恒虚警率算法是在控制虚警率恒定的前提下通过确定检测门限以区分目标和背景的算法^[1]。影响检测性能的主要因素在于杂波分布模型的确定及虚警率的设置。目前较为常用的杂波模型有对数正态分布、高斯分布和 K 分布等。Novak^[2]提出了双参数的 CFAR 检测方法,该方法假定杂波分布模型为高斯分布,而复杂海面的杂波模型一般为非高斯分布。Maurizio^[3]探讨了 Weibull 分布下的 SAR 图像杂波模型,Magraner 等人^[4]提出基于 Gamma 分布的非均匀条件下的检测方法,Makhoul 等人^[5]表明 K 分布能较好拟合杂波分布。但上述方法都事先假设杂波服从某一确定的统计分布,

对于复杂海面杂波不具有通用性。在参数化的方法不适用的情况下,高贵^[6]提出了基于 Parzen 窗的 SAR 图像舰船目标检测算法,以非参数的 Parzen 窗方法估计杂波的概率密度函数,取得了较好的估计效果;但是该方法假设目标占整个 SAR 图像中极少数像素点,将图像中所有像素点均用于估计杂波概率密度函数,在一定程度上会造成漏检。本文算法首先通过 KSW 方法对原始 SAR 图像进行二值化处理,再经形态学处理后按面积大小剔除不符合舰船信息的伪目标。随后对剔除后的 SAR 图像采用 Parzen 窗方法估计杂波的概率密度函数。在虚警率恒定的条件下,根据阈值和杂波概率密度函数的关系确定检测阈值,最终完成目标检测。

2 改进的基于 Parzen 窗的目标检测算法

本文检测算法的中心思想在于消除 SAR 图像中目标像素的影响,利用余下的杂波背景像素来估计杂波的概率密度函数,进而确定检测阈值,完成 SAR 图像舰船目标的检测。检测流程图如图 1 所示。

张 颢(1992-),女,硕士,主要研究方向为雷达信号处理,E-mail:zhanghao132051@126.com;孟祥伟(1966-),男,博士,教授,主要研究方向为信号检测理论;刘 磊(1987-),男,博士,主要研究方向为雷达信号处理;李德胜(1990-),男,硕士,主要研究方向为雷达信号处理。

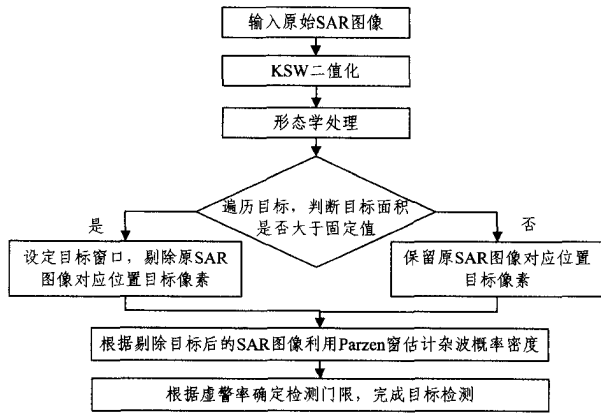


图1 本文算法检测流程图

由图1可知,本算法主要包括KSW二值化处理、形态学处理、利用Parzen窗估计杂波概率密度函数、确定检测阈值及实施目标检测4部分。以下简要介绍该4部分涉及的原理。

2.1 基于KSW方法对SAR图像的二值化处理

Kapur等人^[7]提出的KSW方法通过将目标和背景两类的信息熵最大化来实现阈值的选取。对于灰度范围 $\{1, 2, \dots, n\}$ 的图像直方图,其熵为:

$$H_T = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

其中, p_i 为第 i 个灰度出现的概率。

设阈值 t 将图像划分为背景(A)和目标(B)两类,令 $P_i = \sum_{j=1}^i p_j$, 即 P_i 表示背景(A)像素点出现的概率,则 $1 - P_i$ 表示目标(B)像素点出现的概率。假设背景(A)和目标(B)灰度级的概率分别为 $p(A)$ 和 $p(B)$, 则有:

$$p(A): \frac{p_1}{P_i}, \frac{p_2}{P_i}, \dots, \frac{p_i}{P_i}$$

$$p(B): \frac{p_{i+1}}{1-P_i}, \frac{p_{i+2}}{1-P_i}, \dots, \frac{p_n}{1-P_i}$$

与每个分布有关的熵为 $H_A(t)$ 和 $H_B(t)$, 则有:

$$H_A(t) = -\sum_{i=1}^i \frac{p_i}{P_i} \ln \frac{p_i}{P_i}$$

$$H_B(t) = -\sum_{i=i+1}^n \frac{p_i}{1-P_i} \ln \frac{p_i}{1-P_i}$$

图像的总熵 $H(t)$ 为 $H_A(t)$ 和 $H_B(t)$ 之和, 即

$$H(t) = -\sum_{i=1}^i \frac{p_i}{P_i} \ln \frac{p_i}{P_i} - \sum_{i=i+1}^n \frac{p_i}{1-P_i} \ln \frac{p_i}{1-P_i}$$

最佳阈值 t^* 为使总熵 $H(t)$ 取最大值时 t 的取值, 即:

$$t^* = \text{Arg Max}_{1 \leq t \leq n} \{H(t)\}$$

得到最佳阈值 t^* 后, 对 $m \times n$ 维的 SAR 图像 I 进行二值化处理, 即

$$I_{bc}(i, j) = \begin{cases} 1, & I(i, j) \geq t^* \\ 0, & I(i, j) < t^* \end{cases}$$

式中, I_{bc} 为 KSW 二值化处理后的图像, (i, j) 为对应像素点坐标。

2.2 形态学处理

舰船中央部分的反射系数小于船首和船尾的, 二值化处理后容易造成舰船的首尾分离。因闭运算能弥合裂缝, 连通区域, 故本文采用闭运算处理二值化后 SAR 图像 I_{bc} 。利用 S 对 X 做闭运算, 表示为 $X \cdot S$, 其定义为:

$$X \cdot S = (X \oplus S) \otimes S$$

式中, \oplus 表示膨胀运算; \otimes 表示腐蚀运算; \cdot 表示闭运算。本文闭运算表示为 $I_{c1} = I_{bc} \cdot S$, I_{c1} 为形态学弥补后的图像。

剔除原 SAR 图像中目标的步骤为: a) 筛选出形态学处理后图像 I_{c1} 中面积符合目标信息的区域, 得到 I_{c2} , 统计 I_{c2} 中目标的个数; b) 遍历 I_{c2} 中所有目标, 求出各目标的行最小坐标 i_{\min} 和行最大坐标 i_{\max} , 列最小坐标 j_{\min} 和列最大坐标 j_{\max} , 在各目标处设置外接矩形自适应窗口:

$$T(i, j) = \begin{cases} 1, & i_{\min} < i < i_{\max}, j_{\min} < j < j_{\max} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

c) 剔除原 SAR 图像中的目标的过程, 可表示为 $I_b = I - IT$, I_b 为剔除目标后图像。

2.3 利用 Parzen 窗算法估计杂波的概率密度函数

Parzen 窗算法^[8]利用以观测样本为中心的核函数(窗函数)对概率密度进行内插拟合, 当观测样本的数量足够大时, 这种方法能够对杂波样本的概率分布进行准确地估计, 即当 $N \rightarrow \infty$ 时, 估计的概率密度函数收敛于真实的概率密度函数。

设 x_1, \dots, x_n 为取自同一总体的简单随机样本, $K(u)$ 为定义在 $(-\infty, +\infty)$ 上的一个 Borel 可测函数, 概率密度估计式写为:

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{nh_n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h_n}\right)$$

$\hat{p}(x)$ 为总体概率密度函数 $p(x)$ 的一个核估计, x_i 是采样点, 对应于 SAR 图像的像素灰度值, h_n 是与 n 有关的正数, 称为窗宽。这里要求当 $n \rightarrow \infty$ 时, $h_n \rightarrow 0$ 。 $K(\cdot)$ 是核函数, 采用高斯核时, $K(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-x^2/2)$, 此时, 概率密度估计可写为:

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{nh_n\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{h_n}\right)^2\right\}$$

显然, 核估计的性能受窗宽和核函数的影响。关于窗宽 h_n 的选取, Silverman 等^[9]的研究表明, 若核函数为 Gaussian 函数, 最佳窗宽 h_{opt} 为:

$$h_{opt} = 1.059\sigma n^{-\frac{1}{5}}$$

式中, $\sigma = \left\{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right\}^{1/2}$, 其中 \bar{x} 为样本均值。

这里, 对剔除目标像素后的 SAR 图像 I_b 采用核函数为高斯函数的 Parzen 窗算法估计出杂波的概率密度函数 $p(x)$ 。

2.4 确定检测阈值及完成目标检测

在 SAR 图像舰船目标的检测中, 设置虚警概率为 P_{fa} , 依据 Parzen 窗算法估计出的杂波概率密度函数为 $p(x)$, 检测门限 T 和虚警概率 P_{fa} 有如下关系:

$$P_{fa} = \int_T^{+\infty} p(x) dx$$

通过上述关系确定检测门限 T , 对于原 SAR 图像 I 实施检测, 有:

$$I_{result}(i, j) = \begin{cases} 1, & I(i, j) \geq T \\ 0, & I(i, j) < T \end{cases}$$

其中, $I_{result}(i, j)$ 为最终的检测结果。

3 实验结果分析

这里采用实测的 SAR 图像数据对本文的方法进行验证。首先分析 Parzen 窗算法拟合杂波概率分布的效果, 随后分析本文提出的改进 Parzen 窗检测算法的检测性能。

3.1 杂波的概率密度函数拟合效果

图 2(a) 是一幅 Radarsat I 的 SAR 图像 I_0 。经 KSW 二值化及形态学处理等步骤剔除目标后的 SAR 图像 I_b 如图 2(b) 所示。

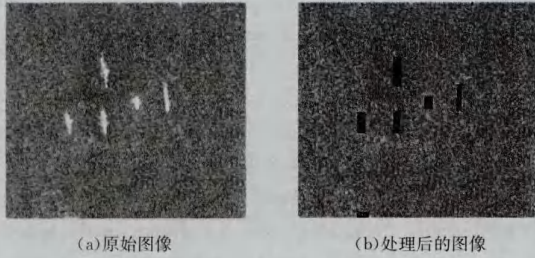
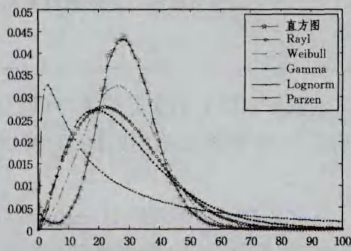
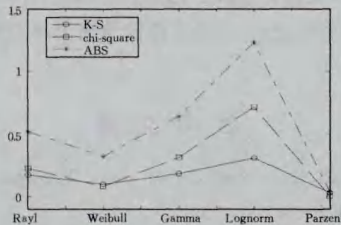


图 2 SAR 图像及处理效果

图 3(a) 给出了去除目标后 SAR 图像杂波像素灰度值的直方图概率分布曲线, 并给出了分别采用 Raighley 分布、Weibull 分布、Gamma 分布、Lognorm 分布拟合出的杂波概率密度函数曲线, 以及采用 Parzen 窗方法估计出的杂波的概率密度函数曲线。采用 Parzen 窗方法估计杂波的概率密度函数曲线时, 根据 SAR 图像计算的窗宽为 $h_n=1.30$ 。



(a) 杂波的概率密度函数拟合曲线



(b) 拟合方法性能比较曲线

图 3 拟合效果图

采用 χ^2 检验、KS 和绝对值误差准则来检验 Raighley 分布、Weibull 分布、Gamma 分布、对数正态分布以及采用 Parzen 窗的估计方法相对于直方图的拟合效果, 得到的数据如表 1 所列, 并根据表格做出性能比较曲线如图 3(b) 所示。

表 1 拟合方法性能比较表

	Raighley 分布	Weibull 分布	Gamma 分布	对数正态分布	Parzen 估计
KS 准则	0.1733	0.0982	0.1850	0.3111	0.0278
χ^2 准则	0.2245	0.0803	0.3155	0.7155	0.0014
绝对值误差准则	0.5209	0.3211	0.6392	1.2311	0.0358

从表 1 中的数据可得出结论, 对于同一幅 SAR 图像, 非参数的 Parzen 窗估计方法的 χ^2 检验、KS 和绝对值误差检验的值比基于参数化的 Raighley 分布、Weibull 分布、Gamma 分布、对数正态分布的拟合方法的值小, 因而更加接近实际 SAR 图像的数据分布, 拟合效果好。故本文采用的 Parzen 窗的估计方法在拟合背景杂波图像分布上有明显优势。

3.2 本文算法的检测效果分析

这里采用 RADARSAT-II 于 2010 年 3 月 8 日在日本东京某港口获取的一幅 SAR 图像作为实验图像。该图像的方位和距离分辨率为 3m, 数据覆盖面积大约为 $20\text{km} \times 20\text{km}$, 对应的图像像素为 16036×11955 。

选取如图 4(a) 中所示的区域, 分别采用传统的双参数算法、全局 Parzen 算法及本文的算法检测 SAR 图像中的舰船目标, 检测结果如图 4(b)~图 4(d) 所示。虚警概率为 10^{-5} , 双参数 CFAR 算法的标称化因子为 5。采用品质因素 $FoM^{[10]}$ 来评价各检测方法的性能优劣:

$$FoM = N_u / (N_{fa} + N_{gl})$$

其中, N_u 表示检测结果中正确的检测目标数, N_{fa} 为虚警目标数, N_{gl} 为实际目标数。

图 4 示出了 3 种检测方法得到的检测效果。其中图 4(a) 为原 SAR 图像, 图 4(b) 为采用双参数算法的检测效果图, 图 4(c) 为采用全局 Parzen 算法的检测效果图, 图 4(d) 为采用本文检测算法的检测效果图。图像中实际舰船的数量为 14, 其中圆圈代表虚警数, 三角代表漏检数, 方框表示正确检测的数量。



图 4 采用 3 种方法检测 SAR 图像的效果图

表 2 列出了对 SAR 图像使用 3 种检测方法的检测结果和完成检测所用时间, 并分别计算了 3 种方法的品质因数和检测效率。

表 2 3 种检测方法的检测性能

检测算法	漏检数量	正确检测数	虚警数量	品质因素	检测效率	耗时 (s)
双参数 CFAR	1	13	2	81.2%	92.8%	6.546052
全局 Parzen 算法	1	13	1	86.7%	92.8%	1.605406
改进后的 Parzen 算法	0	14	1	93.3%	100%	3.859267

分析图 4 和表 2 中的数据可以看出, 本文算法与双参数的 CFAR 算法相比, 正确检测数量增多, 虚警数量和漏检数量均减少, 计算时间有所减少。同全局的 Parzen 算法相比, 因为消除了背景中潜在目标像素的影响, 降低了检测门限, 本文算法漏检数量减少, 检测性能得到了改善, 但时间相较于全局 Parzen 长, 主要原因在于 Parzen 窗估计背景杂波的分布比较耗时。总体而言, 在这 3 种方法中, 本文提出的方法的品质因素最大, 从而验证了本文算法的有效性。

结束语 为了改善全局的 Parzen 窗检测算法的检测性能, 本文提出了一种改进的 Parzen 窗检测算法。该方法在原

Parzen 算法的基础上,通过 KSW 和形态学处理等方法剔除 SAR 图像中的目标像素点,将剔除目标像素点后的背景图像用于估计杂波概率密度函数,再利用杂波概率密度函数与虚警概率的关系确定检测门限,进而完成 SAR 图像舰船目标的检测。通过实测 SAR 图像的实验结果可以看出,改进的 Parzen 窗的估计算法能较好地拟合杂波的分布模型,对于估计复杂海面环境的杂波概率密度函数具有实用性和通用性。并且,改进后的算法由于消除了目标像素点的影响减少了漏检数量,检测性能优于传统的双参数 CFAR 算法和全局的 Parzen 算法。

参 考 文 献

[1] Wang Yun-hua, Liu Xiao-yan, Li Hui-min, et al. Targets detecting in the ocean using the cross-polarized channels of fully polarimetric SAR data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(1): 85-93

[2] Novak L M, Halversen S D, Owirka G J, et al. Effects of polarization and Resolution on SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1): 102-115

[3] Maurizio B, Carmela G. CFAR detection of extended objects in high-resolution SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4): 833-843

[4] Magraner E, Bertaux N, Refregier P. Detection in Gamma-distributed nonhomogeneous background[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2010, 46(3): 1127-1139

[5] Makhoul E, Zhan Yu, Broquetas A, et al. Sea clutter statistical characterization using TerraSAR-X data[C]//2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2014: 5130-5133

[6] Gao Gui. A Parzen-window-kernel-based CFAR algorithm for ship detection in SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 557-561

[7] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. Computer Vision, Graphics and Image Process, 1985, 29(3): 273-285

[8] 张宏稷, 杨健, 李延, 等. 基于条件熵和 Parzen 窗的极化 SAR 舰船检测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(12): 1693-1697

[9] Silverman B W. Density estimation for statistics and data analysis[M]. Chapman & Hall, London, 1986: 84-87

[10] 林旭, 洪峻, 孙显, 等. 一种基于自适应背景杂波模型的宽幅 SAR 图像 CFAR 舰船检测算法[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(1): 75-81

(上接第 141 页)

差在信号完整性上应用十分广泛。

峰值信噪比(PSNR): PSNR 是图像压缩最常用的评价指标。但它只是基于原始图像和重建图像的整体误差统计,而无法表示误差的分布情况。

结构相似性(SSIM)^[6,7]: 一种用于衡量两幅图像相似程度的指标。结构相似性在图像质量的衡量上更能符合人眼对图像质量的判断。

5 与离散余弦变换(DCT)比较

本文选取了 Columbia University Multispectral Image Database^[8]中 32 张不同类型图片,均为 512×512×3 的 RGB 图片。对 DHT 和 DCT 的压缩效果进行比较,其中色度抽样比例均为 4:2:0。

表 3 DHT 与 DCT 比较(n=32)

	DHT	DCT
压缩率	50.2043	50.1706
全局偏差	1.6082	1.5716
MSE	10.9737	10.6252
PSNR	38.4618	38.5947
最大偏差	77.0000	76.2188
SSIM	0.9474	0.9496

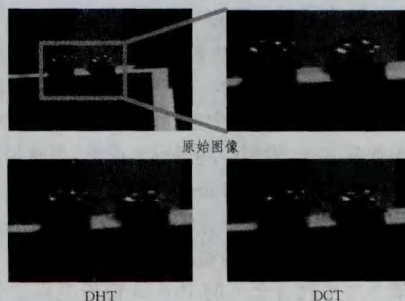


图 2 DHT 与 DCT 比较(n=32)

对比表 3 的数据和图 2 的实际效果可以看出,在使用不同量化表的前提下,针对该测试图集,DHT 和 DCT 的压缩效果相差很小。

结束语 本文实现了利用离散 Hermite 变换进行图像压缩及重建。近年来,离散正交矩阵已经广泛应用于图像压缩,离散 Hermite 变换在矩阵上也得到了实现,本文的测试结果能体现出离散 Hermite 变换在图像压缩上与 JPEG 有相似的效果。

参 考 文 献

[1] Rabbani M, Jones P W. Digital Image Compression Techniques [J]. SPIE Press Book, 1991

[2] Flusser J, Zitova B, Suk T. Moments and moment invariants in pattern recognition[M]. John Wiley & Sons, 2009

[3] Mahadevan A, Acharya S, Sheffer D B, et al. Ballistocardiogram artifact removal in EEG-fMRI signals using discrete Hermite transforms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(6): 839-853

[4] Anichi M. Real time detection of ischemic changes in heart rhythm [D]. The University of Akron, 2010

[5] Refregier A. Shapelets-i, a method for image analysis [J]. Mon. Not R. Astronomy Society, 2003, 338: 35-47

[6] Wang Zhou, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612

[7] Wang Zhou, Bovik A C. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(1): 98-117

[8] Columbia University Multispectral Image Database [DB/OL]. <http://www.cs.columbia.edu/CAVE/databases/multispectral>